

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2003-218429  
(P2003-218429A)

(43)公開日 平成15年7月31日(2003.7.31)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>  
H 01 L 43/08  
G 11 B 5/39  
H 01 F 10/12  
H 01 L 43/12

識別記号

F I  
H 01 L 43/08  
G 11 B 5/39  
H 01 F 10/12  
H 01 L 43/12

テ-マ-ト<sup>7</sup>(参考)  
Z 5 D 0 3 4  
5 E 0 4 9

審査請求 有 請求項の数23 O L (全32頁)

(21)出願番号

特願2002-16760(P2002-16760)

(22)出願日

平成14年1月25日(2002.1.25)

(71)出願人 000010098

アルプス電気株式会社  
東京都大田区雪谷大塚町1番7号

(72)発明者 長谷川 直也  
東京都大田区雪谷大塚町1番7号 アルプ  
ス電気株式会社内

(74)代理人 100085453

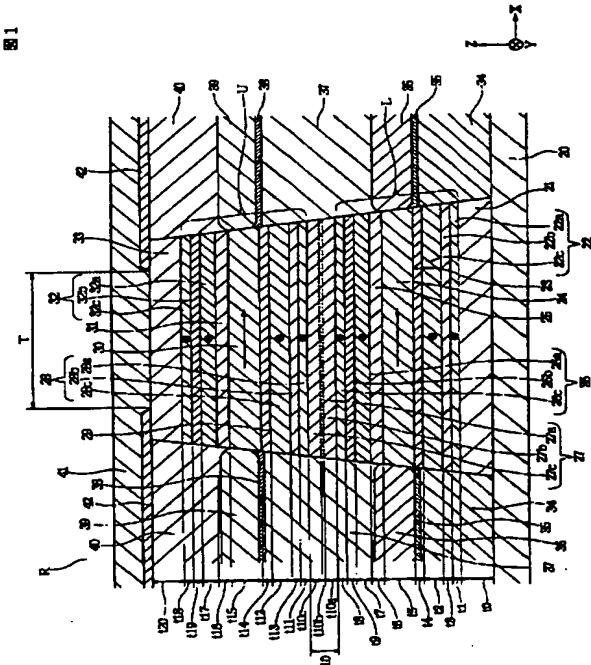
弁理士 野▲崎▼ 照夫  
Fターム(参考) 5D034 AA05 BA03 BA04 BA05 BA09  
BA12 CA04 CA08 DA07  
5E049 AA10 AC05 BA16 CB01

(54)【発明の名称】 磁気検出素子及びその製造方法並びに前記磁気検出素子を用いた磁気検出装置

(57)【要約】

【課題】 垂直記録媒体の磁化遷移領域上を通過するとき、直接パルス信号を出力できる磁気検出素子を提供する。

【解決手段】 固定磁性層22、非磁性材料層23、フリー磁性層24、非磁性材料層25、固定磁性層26が積層された下側多層膜Lと固定磁性層28、非磁性材料層29、フリー磁性層30、非磁性材料層31、固定磁性層32が設けられている上側多層膜Uを有し、第2固定磁性層22c、26aと第2固定磁性層28c、32aの磁化方向を反平行方向にすることにより、磁化遷移領域上を通過する磁気検出素子Rから直接パルス信号を出力できる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 反強磁性層と、前記反強磁性層との間で発生する交換結合磁界によって磁化方向が一定にされる固定磁性層と、非磁性材料層とフリー磁性層とを有し、各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子であり、下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された多層膜が2つ設けられ、

前記反強磁性層は、2つの前記多層膜の間と、下側に位置する前記多層膜の下面と上側に位置する前記多層膜の上面に設けられており、

互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記固定磁性層の磁化方向は反平行方向であることを特徴とする磁気検出素子。

【請求項2】 前記固定磁性層は4つとも全て同じ膜厚で形成されている請求項1記載の磁気検出素子。

【請求項3】 前記固定磁性層は4つ全てが、単位面積当たりの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものである請求項1または2記載の磁気検出素子。

【請求項4】 前記第1固定磁性層と第2固定磁性層は同じ組成の磁性材料からなり、また第1固定磁性層と第2固定磁性層の膜厚が異なる請求項3記載の磁気検出素子。

【請求項5】 それぞれの前記固定磁性層において、前記第1固定磁性層は前記反強磁性層と接し、前記第2固定磁性層は前記フリー磁性層と対向しており、各固定磁性層を構成している前記第1固定磁性層は全て同じ膜厚で形成され、前記第2固定磁性層も全て同じ膜厚で形成されている請求項3または4記載の磁気検出素子。

【請求項6】 2つの前記多層膜を構成している2つの前記フリー磁性層及び4つの前記非磁性材料層はそれぞれ全て同じ膜厚で形成されている請求項1ないし5のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項7】 2つの前記多層膜の間に、硬磁性層を介して2層の反強磁性層が積層されている請求項1ないし6のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項8】 3つまたは4つの前記反強磁性層が全て同じ膜厚で形成されている請求項1ないし7のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項9】 3つまたは4つの前記反強磁性層が全て同一組成の反強磁性材料によって形成されている請求項1ないし8のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項10】 前記反強磁性層が、PtMn合金、または、X-Mn (ただしXは、Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である) 合金で、あるいはPt-Mn-X' (ただしX'は、Pd, Ir, Rh, Ru, Au, Ag, O

s, Cr, Ni, Ar, Ne, Xe, Krのいずれか1または2種以上の元素である) 合金で形成されている請求項1ないし9のいずれかに記載の磁気検出素子。

【請求項11】 請求項1ないし10に記載された磁気検出素子によって、平面形状を有し、面垂直方向に磁化される記録媒体に記録された記録信号磁界を検出することを特徴とする磁気検出装置。

【請求項12】 以下に示す工程を有することを特徴とする磁気検出素子の製造方法、

(a) 下から順に反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び固定磁性層が積層された下側多層膜、並びに反強磁性層、さらに下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された上側多層膜と反強磁性層を連続成膜する工程であり、

前記連続成膜工程において、4つの固定磁性層を単位面積当たりの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものとして形成し、しかも前記下側多層膜では、前記第2固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントを前記第1固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントより大きくし、前記上側多層膜では、前記第1固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントを前記第2固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントより大きくする工程と、

(b) 前記反強磁性層、前記下側多層膜、前記反強磁性層、前記上側多層膜、及び前記反強磁性層からなる積層体を、前記固定磁性層の保磁力より大きく、スピンドルアップ磁界よりも小さい磁場中でアニールすることにより、前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、

互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記第2固定磁性層の磁化方向が反平行方向になるようにする工程。

【請求項13】 前記(a)工程の代わりに、

(c) 下から順に反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び固定磁性層が積層された下側多層膜、並びに反強磁性層、さらに下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された上側多層膜と反強磁性層を連続成膜する工程であり、

前記連続成膜工程において、4つの固定磁性層を単位面積当たりの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものとして形成し、しかも前記上側多層膜では、前記第2固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントを前記第1固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントより大きくし、前記下側多層膜では、前記第1固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントを前記第2固定磁性層の単位面積当たりの磁気モーメントよ

り大きくする工程、を有する請求項12に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項14】以下に示す工程を有することを特徴とする磁気検出素子の製造方法、(d)下から順に反強磁性層、第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層が積層された下側多層膜と前記下側多層膜上に第1中間反強磁性層及び贵金属からなる非磁性保護層を積層する工程と、(e)第1の磁場中アニールを施して、前記反強磁性層又は第1中間反強磁性層と第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、2つの前記第1固定磁性層の磁化を同一方向に固定する工程と、(f)前記非磁性保護層を全部または一部除去する工程と、(g)前記非磁性保護層上または第1中間反強磁性層上に第2中間反強磁性層を積層し、前記第1中間反強磁性層と前記第2中間反強磁性層を有する一つの反強磁性層とし、この反強磁性層上に、下から順に第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層を有する上側多層膜、及び反強磁性層を積層する工程、(h)第2の磁場中アニールを施し、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層と前記反強磁性層間に交換結合磁界を発生させ、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定する工程。

【請求項15】前記非磁性保護層を、Ru、Re、Pd、Os、Ir、Pt、Au、Rhのいずれか1種または2種以上で形成する請求項14に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項16】前記(d)工程で、前記非磁性保護層を3Å以上10Å以下の膜厚で形成する請求項14または15に記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項17】前記(f)工程で、前記非磁性保護層の膜厚が3Å以下となるまで、前記非磁性保護層を削り込むか、あるいは前記非磁性保護層を全て除去する請求項14ないし16のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項18】以下に示す工程を有することを特徴とする磁気検出素子の製造方法、(i)下から順に反強磁性層、第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層が積層された下側多層膜と前記下側多層膜上に反強磁性層及び硬磁性層を積層する工程と、(j)第1の磁場中アニールを施して、前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、2つの前記第1固定磁性層の磁化を同一方向に固定する工程と、(k)前記硬磁性層上に反強磁性層を

10

20

30

40

50

形成し、前記反強磁性層上に、下から順に第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層を有する上側多層膜、及び反強磁性層を積層する工程、(l)第2の磁場中アニールを施し、前記上側多層膜の前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、前記上側多層膜の2つの前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定する工程。

【請求項19】前記第1の磁場中アニールは、前記固定磁性層の飽和磁界より大きい磁場中で行い、前記第2の磁場中アニールは、前記固定磁性層の保磁力より大きく、スピンドロップ磁界よりも小さい磁場中で行う請求項14ないし18のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項20】各固定磁性層を構成している前記第1固定磁性層を全て同じ膜厚で形成し、前記第2固定磁性層も全て同じ膜厚で形成する請求項14ないし19のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項21】2つの前記フリー磁性層及び4つの前記非磁性材料層を、それぞれ全て同じ膜厚で形成する請求項14ないし20のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項22】3つまたは4つの前記反強磁性層を全て同じ膜厚で形成する請求項14ないし21のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【請求項23】最下層に位置する前記反強磁性層の下層及び最上層に位置する前記反強磁性層の上層に電極層を設ける請求項12ないし22のいずれかに記載の磁気検出素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、CPP (current perpendicular to the plane) 型の磁気検出素子に係り、特に、記録媒体の磁化遷移領域上を移動するときにパルス信号を出力することができる磁気検出素子及びその製造方法並びに前記磁気検出素子を用いた磁気検出装置に関する。

【0002】

【従来の技術】図13は、面垂直方向に磁化される記録媒体に記録された記録信号磁界を従来の磁気検出素子で検出している状態を示す模式図である。

【0003】図13に示す磁気検出素子Sは、巨大磁気抵抗効果を利用したGMR (giantmagnetoresistive) 素子の1種であるスピンドロップ型磁気検出素子と呼ばれるものであり、ハードディスクなどの記録媒体からの記録磁界を検出するものである。

【0004】このスピンドロップ型磁気検出素子は、下から反強磁性層1、固定磁性層2、非磁性材料層3、フリ

一磁性層4で構成された多層膜からなり、この多層膜のトラック幅方向(図示X方向)に直流電流が流されてい

る。

【0005】反強磁性層1にはPt-Mn合金膜、固定磁性層2及びフリー磁性層4にはNi-Fe合金膜、非磁性材料層3にはCu(銅)膜が一般的に使用される。

【0006】固定磁性層2の磁化は、反強磁性層1との交換異方性磁界によりY方向(記録媒体からの漏れ磁界方向;ハイト方向)に固定され、フリー磁性層4の磁化は、記録媒体からの漏れ磁界によって回転する。

【0007】図13に示される記録媒体Miは、面垂直方向に磁化される垂直磁気記録方式の記録媒体である。記録媒体Miの走行方向はZ方向である。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】磁気検出素子Sが記録媒体Miの領域Ma上にあり、記録媒体からの漏れ磁界がY方向に与えられると、フリー磁性層4の磁化がXからY方向へ向けて変化し、磁気検出素子の電気抵抗が小さくなる。また、領域Mb上で記録媒体からの漏れ磁界がY方向と反平行方向に与えられると、フリー磁性層4の磁化がY方向と反平行方向へ向けて変化し、磁気検出素子の電気抵抗が大きくなる。この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化により、記録媒体からの漏れ磁界が検出される。

【0009】図14に磁気検出素子が領域Maから領域Mbの記録磁界を検出したときの、磁気検出素子の出力信号波形を示す。

【0010】垂直磁気記録方式の記録媒体Miの領域Ma上には、常にY方向の漏れ磁界が存在し、領域Mb上には常にY方向と反平行方向の漏れ磁界が存在しているために、スピンドル型の磁気検出素子Sからの出力は、図14に示されるように、磁化遷移領域Mtを境にして低電圧状態から高電圧状態に変化する積分出力になる。しかし、現在の磁気検出素子からの出力を処理する信号処理技術では図14の上図のような積分出力の変化を直接処理することができないので、いわゆる微分回路を通して図14の下図のようなパルス波形に変換した後に、信号処理していた。しかし、磁気検出素子からの出力を微分回路に通すと出力信号にノイズが重畠しやすくなり、S/N比が悪化して正味の出力が低下するという問題が生じていた。

【0011】本発明は、上記従来の課題を解決するためのものであり、垂直磁気記録方式の記録媒体に記録されている磁気信号を検出する際に高いレベルのパルス信号を直接出力することのできる磁気検出素子及びその製造方法並びに前記磁気検出素子を用いた磁気検出装置を提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】本発明の磁気検出素子は、反強磁性層と、前記反強磁性層との間で発生する交

換結合磁界によって磁化方向が一定にされる固定磁性層と、非磁性材料層とフリー磁性層とを有し、各層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子であり、下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された多層膜が2つ設けられ、前記反強磁性層は、2つの前記多層膜の間と、下側に位置する前記多層膜の下面と上側に位置する前記多層膜の上面に設けられており、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記固定磁性層の磁化方向は反平行方向であることを特徴とするものである。

【0013】すなわち、本発明の磁気検出素子はいわゆるデュアルスピンドル型の磁気検出素子が2つ重ねられた構造を有しており、しかも、各層の膜面と垂直方向に電流が流れる、CPP(current perpendicular to the plane)磁気検出素子である。

【0014】さらに、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記固定磁性層の磁化方向は反平行方向である。

【0015】これらの構成を有することにより、本発明の磁気検出素子は、面垂直方向に磁化される垂直記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときにパルス信号を出力することができる。

【0016】本発明の磁気検出素子が記録媒体の磁化遷移領域以外の領域上に位置して、2つの多層膜に同じ方向の漏れ磁界が与えられるときには、2つのフリー磁性層の磁化方向は同じ方向に変化する。このとき、一方のフリー磁性層の磁化方向は、非磁性材料層を介して対向している固定磁性層の磁化方向と平行になる方向に変化し、他方のフリー磁性層の磁化方向は、非磁性材料層を介して対向している固定磁性層と磁化方向と反平行になる方向に変化する。

【0017】従って、一方の多層膜では抵抗値が減少し、他方の多層膜では抵抗値が増加する。しかも、この2つの多層膜は直列接続されているので、互いの電圧変化をキャンセルしあうことになり、磁気検出素子からの出力はゼロレベル(ベースライン)になる。

【0018】磁気検出素子と記録媒体の相対位置が変化して、磁気検出素子が記録媒体の磁化遷移領域上に位置したときには、前記2つの多層膜に異なる方向の漏れ磁界が与えられる。このとき、2つのフリー磁性層の磁化方向が異なる方向に変化し、両方の多層膜で同時に抵抗値が減少するか、又は同時に抵抗値が増加する。しかも、この2つの多層膜は直列接続されているので磁気検出素子からの電圧出力はベースラインに対してプラスレベルまたはマイナスレベルになる。

【0019】さらに磁気検出素子と記録媒体の相対位置が変化して、磁気検出素子の2つの多層膜に同じ方向の漏れ磁界が与えられると再び磁気検出素子からの出力はゼロレベルになる。

【0020】従って、本発明の磁気検出素子が記録媒体

の磁化遷移領域をまたいで移動すると、磁気検出素子からプラスレベルまたはマイナスレベルのパルス信号を直接出力できる。このため、従来のように磁気検出素子からの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子のS/N比を大きくすることができる。

【0021】しかも本発明では、デュアルスピンドル型の磁気検出素子が2つ重ねられた構造を有しているので、出力を向上させることができる。

【0022】なお、本発明のように、互いに異なるフリー磁性層に向向している2つの前記固定磁性層の磁化方向を反平行方向にした磁気検出素子を形成するために、固定磁性層の膜厚を制御したり、磁場中アニールの条件を制御する必要があるが、この点については後述する。

【0023】さらに、本発明では、前記固定磁性層は4つとも全て同じ膜厚で形成されていることが好ましい。

【0024】また、本発明では、前記固定磁性層は4つ全てが、単位面積当りの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層された、いわゆるシンセティックフェリ型の固定磁性層であることが好ましい。シンセティックフェリ型の固定磁性層は、第1固定磁性層と第2固定磁性層とが互いに他方の磁化方向を固定しあうので、全体として固定磁性層の磁化方向を一定方向に強力に固定することができる。

【0025】前記第1固定磁性層と前記第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) を異ならせるためには、例えば前記第1固定磁性層と第2固定磁性層を同じ組成の磁性材料から形成し、また第1固定磁性層と第2固定磁性層の膜厚を異ならせるとよい。

【0026】本発明では、後述する製造方法を用いることにより、全ての固定磁性層をシンセティックフェリ型の固定磁性層にしても、互いに異なるフリー磁性層に向向している2つの前記固定磁性層（第2固定磁性層）の磁化方向を反平行方向にした磁気検出素子を形成することができる。

【0027】全ての固定磁性層がシンセティックフェリ型の固定磁性層として形成されるときには、それぞれの前記固定磁性層において、前記第1固定磁性層が前記反強磁性層と接し、前記第2固定磁性層が前記フリー磁性層と対向し、各固定磁性層を構成している前記第1固定磁性層が全て同じ膜厚で形成され、前記第2固定磁性層も全て同じ膜厚で形成されていることが好ましい。

【0028】さらに、2つの前記多層膜を構成している2つの前記フリー磁性層及び4つの前記非磁性材料層は、それぞれ全て同じ膜厚で形成されていることがより好ましい。

【0029】また、本発明では、2つの前記多層膜の間

に、硬磁性層を介して2層の反強磁性層が積層されていることが好ましい。

【0030】本発明では、前記2層の反強磁性層に挟まれた硬磁性層がいわゆるインスタックバイアス層として機能し、前記硬磁性層の端部とフリー磁性層の端部間に静的な結合が発生し、フリー磁性層の磁化方向が一方向にそろえられる。

【0031】本発明のように2つの前記多層膜の間に、インスタックバイアス層として機能する硬磁性層が形成されると、2つの多層膜のそれぞれに形成されている2つのフリー磁性層に均等な縦バイアス磁界を供給することができる。

【0032】また、3つまたは4つの前記反強磁性層が全て同じ膜厚で形成されていることが好ましい。

【0033】2つの多層膜が、それぞれ等しい膜厚の前記固定磁性層、前記フリー磁性層、前記非磁性材料層、及び前記反強磁性層によって形成されると、2つの多層膜の電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくなり、2つの多層膜に同じ方向の漏れ磁界が与えられたときに、それぞれの電圧変化を正確にキャンセルしあうことになるので、パルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を、媒体からの磁界方向が上向きの場合と下向きの場合で正確に合わせることができ、ベースライン（ゼロレベル）を一定に保つことが容易になる。

【0034】特に、インスタックバイアス層として機能する前記硬磁性層を挟む2層の反強磁性層の膜厚が等しいと、一方の多層膜中の前記フリー磁性層と前記硬磁性層間の距離と他方の多層膜中の前記フリー磁性層と前記硬磁性層間の距離が等しくなって、それぞれのフリー磁性層に供給される縦バイアス磁界が等しくなるので好ましい。

【0035】また、本発明では、3つまたは4つの前記反強磁性層が全て同一組成の反強磁性材料によって形成されるようにできる。

【0036】また、本発明では、前記反強磁性層が、 $Pt-Mn$ 合金、または、 $X-Mn$ （ただし $X$ は、 $Pd$ 、 $Ir$ 、 $Rh$ 、 $Ru$ 、 $Os$ 、 $Ni$ 、 $Fe$ のいずれか1種または2種以上の元素である）合金で、あるいは $Pt-Mn-X'$ （ただし $X'$ は、 $Pd$ 、 $Ir$ 、 $Rh$ 、 $Ru$ 、 $Au$ 、 $Ag$ 、 $Os$ 、 $Cr$ 、 $Ni$ 、 $Ar$ 、 $Ne$ 、 $Xe$ 、 $Kr$ のいずれか1または2種以上の元素である）合金で形成されることが好ましい。

【0037】また、本発明の磁気検出装置は、前記磁気検出素子によって、平面形状を有し、面垂直方向に磁化される記録媒体に記録された記録信号磁界を検出することを特徴とするものである。

【0038】本発明の磁気検出装置は、前述のように、面垂直方向に磁化が固定される垂直磁気記録式の記録媒体からの漏れ磁界信号を再生するときに、磁気検出素子からパルス信号を直に出力することができる。

【0039】また、本発明の磁気検出素子の製造方法は、以下に示す工程を有するものである。

【0040】(a) 下から順に反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び固定磁性層が積層された下側多層膜、並びに反強磁性層、さらに下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された上側多層膜、及び反強磁性層を連続成膜する工程であり、前記連続成膜工程において、4つの固定磁性層を単位面積当りの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものとして形成し、しかも前記上側多層膜では、前記第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントを前記第1固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントより大きくし、前記下側多層膜では、前記第1固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントを前記第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントより大きくする工程と、(b) 前記反強磁性層、前記下側多層膜、前記反強磁性層、前記上側多層膜、及び前記反強磁性層からなる積層体を、前記固定磁性層の保磁力より大きく、スピンドロップ磁界よりも小さい磁場中でアニールすることにより、前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記第2固定磁性層の磁化方向が反平行方向になるようにする工程。

【0041】本発明の磁気検出素子の製造方法では、前記(a)工程において、前記第1固定磁性層及び第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントを設定し、前記(b)工程において磁場中アニールの磁界の大きさを設定している。これによって、一回の磁場中アニール工程を行うだけで、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記第2固定磁性層の磁化方向が反平行方向になるようになる。

【0042】従って、本発明によって形成された磁気検出素子は、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときにパルス信号を出力できる。特に、面垂直方向に磁化される垂直磁気記録式の記録媒体からの洩れ磁界信号を再生するときに、パルス信号を直に出力することができる。

【0043】また、本発明では、前記下側多層膜から前記上側多層膜まで、真空中で連続成膜することができるため、磁気検出素子中に大気中の不純物が混入することを避けることができる。

【0044】また、本発明では、前記(a)工程の代わりに、(c) 下から順に反強磁性層、固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び固定磁性層が積層された下側多層膜、並びに反強磁性層、さらに下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された上側多層膜と反強磁性層を連続成膜する工程であり、前記連続成膜工程

において、4つの固定磁性層を単位面積当りの磁気モーメント ( $M_s \times t$  ; 飽和磁化と膜厚の積) が異なる第1固定磁性層と第2固定磁性層が非磁性中間層を介して積層されたものとして形成し、しかも前記上側多層膜では、前記第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントを前記第1固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントより大きくし、前記下側多層膜では、前記第1固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントを前記第2固定磁性層の単位面積当りの磁気モーメントより大きくする工程を有してもよい。

【0045】また、本発明の磁気検出素子の製造方法は、以下に示す工程を有するものであってもよい。

(d) 下から順に反強磁性層、第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層が積層された下側多層膜と前記下側多層膜上に第1中間反強磁性層及び貴金属からなる非磁性保護層を積層する工程と、(e) 第1の磁場中アニールを施して、前記反強磁性層又は第1中間反強磁性層と第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、2つの前記第1固定磁性層の磁化を同一方向に固定する工程と、(f) 前記非磁性保護層を全部または一部除去する工程と、(g) 前記非磁性保護層上または第1中間反強磁性層上に第2中間反強磁性層を積層し、前記第1中間反強磁性層と前記第2中間反強磁性層を有する一つの反強磁性層とし、この反強磁性層上に、下から順に第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層を有する上側多層膜、及び反強磁性層を積層する工程、(h) 第2の磁場中アニールを施し、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層と前記反強磁性層間に交換結合磁界を発生させ、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定する工程。

【0046】本発明では、下側多層膜を第1の磁場中アニールにかけて、下側多層膜中の第1固定磁性層を所定の方向に固定した後、上側多層膜を形成し、第2の磁場中アニールにかけて、上側多層膜中の前記反強磁性層又は第2中間反強磁性層と第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させる。

【0047】これにより、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定することができ、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記第2固定磁性層の磁化方向を反平行方向にできる。

【0048】従って、本発明によって形成された磁気検出素子も、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときにパルス信号を出力できる。特に、面垂直方向に磁

化される垂直磁気記録式の記録媒体からの洩れ磁界信号を再生するときに、パルス信号を直に出力することができる。

【0049】本発明では、前記(e)工程で、下側多層膜中に形成されている2つの前記第1固定磁性層の磁化を同一方向に固定した後、前記非磁性保護層を全部又は一部除去する。

【0050】本発明では、前記非磁性保護層を貴金属で形成しているので、前記非磁性保護層を薄く形成しても十分な酸化保護作用があり、前記非磁性保護層の除去を低エネルギーのイオンミリングによって行うことができる。従って、前記第1中間反強磁性層をイオンミリングによるダメージから保護できる。

【0051】なお、低エネルギーのイオンミリングとは、ビーム電圧(加速電圧)が1000V未満のイオンビームを用いたイオンミリングであると定義される。例えば、150V~500Vのビーム電圧が用いられる。

【0052】また本発明では、前記(d)工程で、前記非磁性保護層を3Å以上で10Å以下で形成することが好ましい。この程度の薄い膜厚であれば、非磁性保護層を前記(f)工程で低エネルギーのイオンミリングで削って容易に膜厚調整でき、前記非磁性保護層下の第1中間反強磁性層に前記イオンミリングにおけるダメージを与える心配がない。

【0053】本発明では、前記非磁性保護層を、Ru、Re、Pd、Os、Ir、Pt、Au、Rhのいずれか1種または2種以上で形成することが好ましい。

【0054】さらに、本発明では、前記(f)工程で、前記非磁性保護層の膜厚が3Å以下となるまで、前記非磁性保護層を除去するか、あるいは前記非磁性保護層を全て除去することが好ましい。

【0055】これによって前記(g)工程で形成される第2中間反強磁性層と前記第1中間反強磁性層間に反強磁性的な相互作用を生じさせ、前記第1中間反強磁性層と第2中間反強磁性層とを一体の反強磁性層にでき、第1固定磁性層の磁化方向を適切に固定することが可能になる。

【0056】また、本発明の磁気検出素子の製造方法は、以下に示す工程を有するものであってもよい。

【0057】(i) 下から順に反強磁性層、第1固定磁性層と非磁性中間層と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層が積層された下側多層膜と前記下側多層膜上に反強磁性層及び硬磁性層を積層する工程と、(j) 第1の磁場中アニールを施して、前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、2つの前記第1固定磁性層の磁化を同一方向に固定する工程と、

(k) 前記硬磁性層上に反強磁性層を形成し、前記反強磁性層上に、下から順に第1固定磁性層と非磁性中間層

10

20

30

40

50

と第2固定磁性層からなる固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、及び第2固定磁性層と非磁性中間層と第1固定磁性層からなる固定磁性層を有する上側多層膜、及び反強磁性層を積層する工程、(l) 第2の磁場中アニールを施し、前記上側多層膜の前記反強磁性層と前記第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させ、前記上側多層膜の2つの前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定する工程。

【0058】本発明では、下側多層膜を第1の磁場中アニールにかけて、下側多層膜中の第1固定磁性層を所定の方向に固定した後、上側多層膜を形成し、第2の磁場中アニールにかけて、上側多層膜中の前記反強磁性層と第1固定磁性層間に交換結合磁界を発生させる。

【0059】これにより、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定することができ、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記第2固定磁性層の磁化方向が反平行方向になるようできる。

【0060】従って、本発明によって形成された磁気検出素子も、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときにパルス信号を出力できる。特に、面垂直方向に磁化される垂直磁気記録式の記録媒体からの洩れ磁界信号を再生するときに、パルス信号を直に出力することができる。

【0061】なお、本発明における硬磁性層はいわゆるインスタックバイアス層として機能するものである。前記硬磁性層の端部とフリー磁性層の端部間に静磁的な結合が発生し、フリー磁性層の磁化方向が一方向にそろえられる。

【0062】本発明のように2つの前記多層膜の間に、インスタックバイアス層として機能する硬磁性層が形成されると、2つの多層膜のそれぞれに形成されている2つのフリー磁性層に均等な縦バイアス磁界を供給することができる。

【0063】なお、上述した第1の磁場中アニールと第2の磁場中アニールを行う2つの磁気検出素子の製造方法において、前記第1の磁場中アニールを、固定磁性層の飽和磁界より大きい磁場中で行い、前記第2の磁場中アニールを、固定磁性層の保磁力より大きく、スピンドロップ磁界よりも小さい磁場中で行うことが好ましい。

【0064】これにより、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化方向を変化させずに、前記上側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化を、前記下側多層膜の前記第1固定磁性層の磁化と反平行方向に固定することができる。

【0065】また、上述した第1の磁場中アニールと第2の磁場中アニールを行う2つの磁気検出素子の製造方法を用いると、各固定磁性層を構成している前記第1固定磁性層を全て同じ膜厚で形成し、前記第2固定磁性層

も全て同じ膜厚で形成することができる。

【0066】さらに、2つの前記多層膜を構成している2つの前記フリー磁性層及び4つの前記非磁性材料層をそれぞれ全て同じ膜厚で形成することができるよう好ましい。さらに、3つまたは4つの前記反強磁性層が全て同じ膜厚で形成されていることが好ましい。

【0067】2つの多層膜が、それぞれ等しい膜厚の前記固定磁性層、前記フリー磁性層、前記非磁性材料層、及び前記反強磁性層によって形成されると、2つの多層膜の電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくなり、2つの多層膜に同じ方向の漏れ磁界が与えられたときに、それぞれの電圧変化を正確にキャンセルしあうことになるので、パルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を、媒体からの磁界方向が上向きの場合と下向きの場合で正確に合わせることができ、ベースライン(ゼロレベル)を一定に保つことが容易になる。

【0068】特に、インスタックバイアス層として機能する前記硬磁性層を挟む2層の反強磁性層の膜厚が等しいと、一方の多層膜中の前記フリー磁性層と前記硬磁性層間の距離と他方の多層膜中の前記フリー磁性層と前記硬磁性層間の距離が等しくなって、それぞれのフリー磁性層に供給される縦バイアス磁界が等しくなるので好ましい。

【0069】また、最下層に位置する前記反強磁性層の下層及び最上層に位置する前記反強磁性層の上層に電極層を設けることにより、磁気検出素子を構成する2つの多層膜及び3つの反強磁性層の膜面と垂直方向に電流が流れる磁気検出素子にすることができる。

#### 【0070】

【発明の実施の形態】図1は、本発明における第1の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。なお、図1ではX方向に延びる素子の中央部分のみを破断して示している。

【0071】図1に示す磁気検出素子は、記録媒体に記録された外部信号を再生するためのMRヘッドである。記録媒体との対向面は、例えば磁気検出素子の構成する薄膜の膜面に垂直で且つ磁気検出素子のフリー磁性層の外部磁界が印加されていないときの磁化方向と平行な平面である。図1では、記録媒体との対向面はX-Z平面に平行な平面である。

【0072】なお、磁気検出素子が浮上式の磁気ヘッドに用いられる場合、記録媒体との対向面とは、いわゆるABS面のことである。

【0073】また磁気検出素子は、例えばアルミナーチタンカーバイト( $Al_2O_3-TiC$ )で形成されたスライダのトレーリング端面上に形成される。スライダは、記録媒体との対向面と逆面側で、ステンレス材などによる弾性変形可能な支持部材と接合され、磁気ヘッド装置が構成される。

【0074】なお、記録媒体は磁気検出素子の記録媒体

との対向面に対向しており、図示Z方向に移動する。この記録媒体からの漏れ磁界方向は図示Y方向(ハイト方向)である。

【0075】図1に示す符号20は、第1の電極層である。第1の電極層20は、例えば $a-Ta$ 、 $Al$ 、 $Cu$ 、 $Cr$ 、 $Cu$ (銅)や $W$ (タンゲステン)などで形成されている。

【0076】第1の電極層20の中央上面には、反強磁性層21が形成される。反強磁性層21は、元素X(ただしXは、 $Pt$ 、 $Pd$ 、 $Ir$ 、 $Rh$ 、 $Ru$ 、 $Os$ のうち1種または2種以上の元素である)と $Mn$ とを含有する反強磁性材料で形成されることが好ましい。あるいは反強磁性層21は、元素Xと元素X'(ただし元素X'は、 $Ne$ 、 $Ar$ 、 $Kr$ 、 $Xe$ 、 $Be$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$ 、 $Mg$ 、 $Al$ 、 $Si$ 、 $P$ 、 $Ti$ 、 $V$ 、 $Cr$ 、 $Fe$ 、 $Co$ 、 $Ni$ 、 $Cu$ 、 $Zn$ 、 $Ga$ 、 $Ge$ 、 $Zr$ 、 $Nb$ 、 $Mo$ 、 $Ag$ 、 $Cd$ 、 $Sn$ 、 $Hf$ 、 $Ta$ 、 $W$ 、 $Re$ 、 $Au$ 、 $Pb$ 、及び希土類元素のうち1種または2種以上の元素である)と $Mn$ を含有する反強磁性材料により形成されることが好ましい。

【0077】これらの反強磁性材料は、耐食性に優れしかもブロッキング温度も高く次に説明する固定磁性層22の第1固定磁性層22aとの界面で大きな交換結合磁界を発生し得る。また反強磁性層21は50Å以上で250Å以下の膜厚で形成されることが好ましい。

【0078】なお第1の電極層20と反強磁性層21との間には、 $Ta$ などで形成された下地層と、 $NiFe$ 合金などで形成されたシードレイヤが形成されていてもよい。シードレイヤは、主として面心立方晶から成り、反強磁性層21との界面と平行な方向に(111)面が優先配向されている。シードレイヤは、 $NiFe$ 合金以外に、 $Ni-Fe-Y$ 合金(ただしYは、 $Cr$ 、 $Rh$ 、 $Ta$ 、 $Hf$ 、 $Nb$ 、 $Zr$ 、 $Ti$ から選ばれる少なくとも1種以上)、 $Cr$ で形成されてもよい。これらの材質で形成されたシードレイヤは $Ta$ 等で形成された下地層上に形成されることにより反強磁性層21との界面と平行な方向に(111)面が優先配向しやすくなる。シードレイヤは、例えば30Å程度で形成される。

【0079】なお本発明における磁気検出素子Rは各層の膜面と垂直方向にセンス電流が流れるCPP型であるため、シードレイヤにも適切にセンス電流が流れる必要性がある。よってシードレイヤは比抵抗の高い材質でないことが好ましい。すなわちCPP型ではシードレイヤは $NiFe$ 合金、 $Cr$ などの比抵抗の低い材質で形成されることが好ましい。

【0080】次に反強磁性層21の上には固定磁性層22が形成されている。この実施形態では固定磁性層22は3層構造で形成されている。

【0081】固定磁性層22を構成する第1固定磁性層22a及び第2固定磁性層22cの層は磁性材料からな

る層であり、例えばCo、CoFe合金、CoFeNi合金、NiFe合金などで形成される。第1固定磁性層22aと第2固定磁性層22cの間には非磁性導電材料で、具体的にはRu、Rh、Ir、Cr、Re、Cuのうち1種あるいは2種以上の合金で形成された非磁性中間層22bが介在し、この構成により、第1固定磁性層22aと第2固定磁性層22cの磁化方向は互いに反平行状態にされる。これはいわゆるシンセティックフェリ状態と呼ばれる。

【0082】反強磁性層21と第1固定磁性層22a間に10  
には磁場中熱処理によって交換結合磁界が発生し、例えば第1固定磁性層22aの磁化がハイト方向(図示Y方向)と180°異なる方向に固定された場合、もう一方の第2固定磁性層22cはRKKY相互作用によりハイト方向に磁化され固定される。この構成により固定磁性層22の磁化を安定した状態にでき、また固定磁性層22と反強磁性層21との界面で発生する交換結合磁界を見かけ上大きくすることができる。

【0083】なお例えば、第1固定磁性層22aの膜厚t1及び第2固定磁性層22cの膜厚t2はそれぞれ10~70Å程度で形成される。また非磁性中間層22bの膜厚t3は3Å~10Å程度で形成で形成される。

【0084】また第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cはそれぞれ単位面積当たりの磁気モーメントが異なるように、第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cの材質や膜厚がそれぞれ異なっている。単位面積当たりの磁気モーメントは飽和磁化Ms×膜厚tで設定され、例えば第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cを共に同じ材質で同じ組成の材料で形成するとき、第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cの膜厚を異ならせることで、第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cの単位面積当たりの磁気モーメントを異ならせることができる。これによって適切に第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22cを人工フェリ磁性構造にすることが可能である。

【0085】固定磁性層22の上には非磁性材料層23が形成されている。非磁性材料層23は例えばCuなどの電気抵抗の低い導電性材料によって形成される。非磁性材料層23の膜厚t4は例えば25Å程度である。

【0086】次に非磁性材料層23の上にはフリー磁性層24が形成される。フリー磁性層24は、NiFe合金、CoFeNi合金、CoFe合金、Coなどで形成されている。フリー磁性層24の膜厚は例えば30Å~100Åである。

【0087】フリー磁性層24の上には非磁性材料層25が形成されている。非磁性材料層25は、非磁性材料層23と同じようにCuなどで形成される。非磁性材料層25の膜厚t6は例えば25Å程度である。

【0088】なお、フリー磁性層24と非磁性材料層23及び/又は非磁性材料層25の間に、フリー磁性層2

4の材料が非磁性材料層23や非磁性材料層25に拡散することを防ぐためのCoやCoFeからなる拡散防止層が形成されてもよい。

【0089】非磁性材料層25の上には固定磁性層26が形成されている。固定磁性層26は、固定磁性層22と同じように人工フェリ磁性構造で構成されている。

【0090】固定磁性層26を構成する第2固定磁性層26a及び第1固定磁性層26cの層は磁性材料からなる層であり、例えばCo、CoFe合金、CoFeNi合金、NiFe合金などで形成される。第2固定磁性層26aと第1固定磁性層26cの間には非磁性導電材料で、具体的にはRu、Rh、Ir、Cr、Re、Cuのうち1種あるいは2種以上の合金で形成された非磁性中間層26bが介在し、この構成により、第2固定磁性層26aと第1固定磁性層26cの磁化方向は互いに反平行状態にされる。

【0091】この実施形態では、固定磁性層26のうち、第1固定磁性層26cは次に説明する反強磁性層27と接していて交換結合磁界が発生しており、例えば第1固定磁性層26cの磁化がハイト方向と180°異なる方向に固定された場合、もう一方の第2固定磁性層26aはRKKY相互作用によりハイト方向に固定される。

【0092】なお固定磁性層26の第2固定磁性層26a及び第1固定磁性層26cも、それぞれ単位面積当たりの磁気モーメント(飽和磁化Ms×膜厚t)が異なるように、異なる材質や膜厚が選択されて形成されている。

【0093】第2固定磁性層26aの膜厚t7及び第1固定磁性層26cの膜厚t8はそれぞれ10~70Å程度で形成される。また非磁性中間層26bの膜厚t9は3Å~10Å程度で形成で形成される。

【0094】固定磁性層22、非磁性材料層23、フリー磁性層24、非磁性材料層25、固定磁性層26が本発明の磁気検出素子Rを構成する2つの多層膜のうちのひとつである下側多層膜Lを構成している。

【0095】次に固定磁性層26の上には反強磁性層27が形成されている。反強磁性層27は反強磁性層21と同様に、元素X(ただしXは、Pt、Pd、Ir、Rh、Ru、Osのうち1種または2種以上の元素である)とMnとを含有する反強磁性材料で形成されることが好ましい。あるいは反強磁性層27は、元素Xと元素X'(ただし元素X'は、Ne、Ar、Kr、Xe、Be、B、C、N、Mg、Al、Si、P、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Zr、Nb、Mo、Ag、Cd、Sn、Hf、Ta、W、Re、Au、Pb、及び希土類元素のうち1種または2種以上の元素である)とMnを含有する反強磁性材料により形成されることが好ましい。

【0096】なお、後に説明する磁気検出素子Rの製造方法を用いて、図1の磁気検出素子Rを形成すると、反

強磁性層27が、第1中間反強磁性層27aと、1Å以上3Å以下の膜厚の貴金属からなる非磁性保護層27b及び第2中間反強磁性層27cからなる多層構造を有するものになる。

【0097】第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cは、同じ組成の反強磁性材料、具体的には上述のPtMn合金、X-Mn合金で、あるいはPt-Mn-X'合金を用いて形成される。

【0098】第1中間反強磁性層27aの膜厚t10aはそれぞれ50Å以上250Å以下である。例えば80Åである。なお、第1中間反強磁性層27aは単独で反強磁性を示す膜厚、例えば50Å以上にする必要があるが、第2中間反強磁性層27cは単独では反強磁性を示さない膜厚、例えば10Å以上50Å以下であってもよい。

【0099】また、非磁性保護層27bは1Å以上3Å以下の薄い膜厚であり、Ru、Re、Pd、Os、Ir、Pt、Au、Rhのいずれか1種または2種以上で形成されているので、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cに反強磁性的な相互作用を生じさせ、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cを一体の反強磁性層として機能させることが可能になる。また、非磁性保護層27bの材料が、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27c中に拡散しても、反強磁性の性質は劣化しない。

【0100】なお、非磁性保護層27bが存在せず、反強磁性層27が第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cからなるものであってもよい。また、反強磁性層27が単層の反強磁性層であってもよい。

【0101】反強磁性層27の上には、第1固定磁性層28a、非磁性中間層28b、第2固定磁性層28cからなるシンセティックフェリ型の固定磁性層28、非磁性材料層29、フリー磁性層30、非磁性材料層31、第2固定磁性層32a、非磁性中間層32b、第1固定磁性層32cからなるシンセティックフェリ型の固定磁性層32が本発明の磁気検出素子Rを構成する2つの多層膜のうちのひとつである上側多層膜Uを構成している。

【0102】上側多層膜Uを構成する各層の材料は、下側多層膜Lの同じ名称の層の材料と同じである。

【0103】上側多層膜Uの上には第1固定磁性層32cに接する反強磁性層33が形成される。反強磁性層33も反強磁性層21及び反強磁性層27と同様に、元素X（ただしXは、Pt、Pd、Ir、Rh、Ru、Osのうち1種または2種以上の元素である）とMnとを含有する反強磁性材料で形成されることが好ましい。あるいは反強磁性層33は、元素Xと元素X'（ただし元素X'は、Ne、Ar、Kr、Xe、Be、B、C、N、Mg、Al、Si、P、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Zr、Nb、Mo、A

g、Cd、Sn、Hf、Ta、W、Re、Au、Pb、及び希土類元素のうち1種または2種以上の元素である）とMnを含有する反強磁性材料により形成されることが好ましい。

【0104】なお、後述する製造方法を用いると、磁気検出素子Rの反強磁性層21、反強磁性層27、及び反強磁性層33は3つとも同じ組成比の反強磁性材料によって形成することができる。

【0105】次に図1に示すように反強磁性層21及び固定磁性層22のトラック幅方向（図示X方向）における両側端面には、第1の電極層20上に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やSiO<sub>2</sub>などで形成された絶縁層34が形成されている。なおこの実施形態では、絶縁層34の上面は、フリー磁性層24の下面よりも下側に位置している。

【0106】絶縁層34の上にはバイアス下地層35が形成されている。そしてバイアス下地層35の上にはハードバイアス層36がフリー磁性層24の側面に対向する位置に形成されている。

【0107】バイアス下地層35は、結晶構造が体心立方構造（bcc構造）の金属膜で形成されることが好ましい。なおこのときバイアス下地層35の結晶配向は（100）面が優先配向することが好ましい。

【0108】またハードバイアス層36は、CoPt合金やCoPtCr合金などで形成される。これら合金の結晶構造は、面心立方構造（fcc）と稠密六方構造（hcp）の混相となっている。

【0109】ここで上記の金属膜で形成されたバイアス下地層35とハードバイアス層36を構成するCoPt系合金のhcp構造の格子定数は近い値となるために、CoPt系合金はfcc構造を形成しづらくhcp構造で形成されやすくなる。このときhcp構造のc軸はCoPt系合金の境界面内に優先配向される。hcp構造はfcc構造に比べてc軸方向に大きな磁気異方性を生じるため、ハードバイアス層36に磁界を与えたときの保磁力Hcは大きくなる。さらにhcpのc軸はCoPt系合金とバイアス下地層35との境界面内で優先配向となっているため、残留磁化が増大し、残留磁化/飽和磁化で求められる角形比Sは大きくなる。その結果、ハードバイアス層36の特性を向上させることができ、ハードバイアス層36から発生するバイアス磁界を増大させることができる。

【0110】本発明では、結晶構造が体心立方構造（bcc構造）の金属膜は、Cr、W、Mo、V、Mn、Nb、Taのいずれか1種または2種以上の元素で形成されることが好ましい。なお本発明ではバイアス下地層35が形成されていなくてもよい。

【0111】またこの実施形態では、ハードバイアス層36の上面は、フリー磁性層24の上面よりも上側に位置している。

【0112】さらに、ハードバイアス層36の上にAl

$\text{ZnO}_3$ や $\text{SiO}_2$ などの絶縁層37が形成されている。絶縁層37の上にはバイアス下地層38が形成され、バイアス下地層38の上にはハードバイアス層39がフリー磁性層30の側面に対向する位置に形成されている。バイアス下地層38の材料はバイアス下地層35の材料と同じであり、ハードバイアス層39の材料はハードバイアス層36の材料と同じである。

【0113】ハードバイアス層39の上には、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ や $\text{SiO}_2$ などの絶縁層40が形成されている。

【0114】そして絶縁層40から反強磁性層33上にかけて第2の電極層41が形成されている。第2の電極層41の材質は第1の電極層20と同じように、例えば $\alpha\text{-Ta}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Cu}$ （銅）や $\text{W}$ （タンゲステン）などで形成されている。

【0115】また、図示していないが、電極層20の下面に接して、 $\text{NiFe}$ などの軟磁性材料からなる下部シールド層が設けられ、電極層41の上面に接して、同じく $\text{NiFe}$ などの軟磁性材料からなる上部シールド層が設けられる。ただし、 $\text{NiFe}$ などの軟磁性材料は導電性を有するので下部シールド層を直接反強磁性層21の下面に接するように形成して電極層として機能させてもよいし、また、上部シールド層を直接反強磁性層33の上面に接するように形成して電極層として機能させてもよい。

【0116】図1に示される磁気検出素子Rは、電極層20、41からのセンス電流が、上側多層膜U及び下側多層膜Lの各層の膜面と垂直方向に流れるCPP型（current perpendicular to the plane）と呼ばれるものである。

【0117】そして、下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された、いわゆるデュアルスピンドル型の多層膜が2つ直列に接続されており、前記反強磁性層が2つの多層膜の間と下側の多層膜の下面と上側の多層膜の上面とに設けられているものである。

【0118】図1に示された磁気検出素子Rでは、記録媒体からの洩れ磁界が磁気検出素子Rの図示Y方向に侵入し、フリー磁性層の磁化が変動したときに、この磁化方向の変動と、固定磁性層の固定磁化方向との関係で電気抵抗が変化し、この電気抵抗値の変化に基づく電圧変化により、記録媒体からの洩れ磁界が検出される。

【0119】なお、図1に示される磁気検出素子Rでは、反強磁性層33のトラック幅方向（図示X方向）の両側端部上にまでアルミナや $\text{SiO}_2$ からなる絶縁層42が延出形成され、絶縁層42間に所定の間隔Tが開けられている。このように、反強磁性層33の両側端部と第2の電極層41間に絶縁層42が介在すると、前記第2の電極層41からのセンス電流は、前記間隔Tの上側多層膜U及び下側多層膜L内ののみを流れる。

【0120】したがっての実際の素子サイズを大きく形

成しても、上側多層膜Uと下側多層膜L内への電流経路を絞り込むことができ、実質的に磁気抵抗効果に関与する素子サイズ（実効的な素子サイズ）を小さくできるから、一般的なフォトリソグラフィー技術の精度を用いて素子サイズの大きい上側多層膜U及び下側多層膜L並びに反強磁性層21、27、33を形成しても、再生出力の大きい磁気検出素子Rを製造することが可能である。

【0121】次に、図1に示された本発明の実施の形態の磁気検出素子Rの特徴となる構成を説明する。磁気検出素子Rの特徴は、固定磁性層の磁化方向の設定にある。

【0122】まず、下側多層膜L中にあるシンセティックフェリ型の固定磁性層22の第1固定磁性層22aは、反強磁性層21との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向と $180^\circ$ 異なる方向に固定されており、第2固定磁性層22cの磁化方向はY方向に固定されている。同様に、シンセティックフェリ型の固定磁性層26の第1固定磁性層26cは反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向と $180^\circ$ 異なる方向に固定されており、第2固定磁性層26aの磁化方向はY方向に固定されている。

【0123】固定磁性層22の第1固定磁性層22aの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）よりも第2固定磁性層22cの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）を大きくしているので、合成の単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）の方向である固定磁性層22の磁化方向は図示Y方向となる。また、固定磁性層26でも第1固定磁性層26cの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）よりも第2固定磁性層26aの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）を大きくしているので、合成の単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）の方向である固定磁性層26の磁化方向は図示Y方向となる。

【0124】図1では、第1固定磁性層22a及び第2固定磁性層22c並びに第1固定磁性層26c及び第2固定磁性層26aと同じ材料を用いて形成し、それぞれの膜厚を異ならせることにより、それぞれの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）を調節している。

【0125】一方、上側多層膜U中にあるシンセティックフェリ型の固定磁性層28の第1固定磁性層28aは、反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向に固定されており、第2固定磁性層28cの磁化方向はY方向と $180^\circ$ 異なる方向に固定されている。同様に、シンセティックフェリ型の固定磁性層32の第1固定磁性層32cは反強磁性層33との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向に固定されており、第2固定磁性層32aの磁化方向はY方向と $180^\circ$ 異なる方向に固定されている。

【0126】また、固定磁性層28の第1固定磁性層28aの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）よりも第2固定磁性層28cの単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）を大きくしているので、合成の単位面積当たりの磁気モーメント（ $\text{Ms} \times \text{t}$ ）の方向である固定磁性層28の磁化方向は図示Y方向となる。

も第2固定磁性層28cの単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )を大きくしているので、合成の単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )の方向である固定磁性層28の磁化方向は図示Y方向と180°異なる方向になる。また、固定磁性層32でも第1固定磁性層32cの単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )よりも第2固定磁性層32aの単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )を大きくしているので、合成の単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )の方向である固定磁性層32の磁化方向は図示Y方向と180°異なる方向になる。

【0127】図1では、第1固定磁性層28a及び第2固定磁性層28c並びに第1固定磁性層32c及び第2固定磁性層32aと同じ材料を用いて形成し、さらに、それぞれの膜厚を異ならせることにより、それぞれの単位面積当たりの磁気モーメント( $M_s \times t$ )を調節している。

【0128】このように、図1に示される磁気検出素子Rでは、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの第2固定磁性層の磁化方向は反平行方向になっている。

【0129】シンセティックフェリ型の固定磁性層22、26、28、32は、第1固定磁性層22a、26c、28a、32c及び第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの固定磁化による反磁界(双極子磁界)を、第1固定磁性層22a、26c、28a、32c及び第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの静磁界結合同士が相互に打ち消し合うことによりキャンセルできる。これにより、固定磁性層22、26、28、32の固定磁化による反磁界(双極子磁界)からの、フリー磁性層24、30の変動磁化への寄与を減少させることができる。

【0130】従って、フリー磁性層24、30の変動磁化の方向を所望の方向に補正することがより容易になり、アシンメトリーの小さい再生波形の対称性の優れたスピンドル型薄膜磁気素子を得ることが可能になる。

【0131】ここで、アシンメトリーとは、再生出力波形の非対称性の度合いを示すものであり、再生出力波形が与えられた場合、波形が対称であればアシンメトリーが小さくなる。従って、アシンメトリーが0に近づく程再生出力波形が対称性に優れていることになる。

【0132】前記アシンメトリーは、フリー磁性層の磁化の方向と固定磁性層の固定磁化の方向とが直交しているときに0となる。アシンメトリーが大きくずれるとメディアからの情報の読み取りが正確にできなくなり、エラーの原因となる。このため、前記アシンメトリーが小さいものほど、再生信号処理の信頼性が向上することになり、スピンドル型薄膜磁気素子として優れたものとなる。

【0133】また、固定磁性層22、26、28、32

の固定磁化による反磁界(双極子磁界)は、フリー磁性層24、30の素子高さ方向において、その端部で大きく中央部で小さいという不均一な分布を持ち、フリー磁性層24、30内における単磁区化が妨げられる場合があるが、固定磁性層22、26、28、32を上記の積層構造とすることにより双極子磁界を小さくすることができ、これによってフリー磁性層24、30内に磁壁ができる磁化の不均一が発生しバルクハウゼンノイズなどが発生することを防止することができる。

10 【0134】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はハードバイアス層との磁気的結合により、固定磁性層22、26、28、32の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、電気抵抗値の変化(出力)に直接寄与する第2固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されていない状態で直交していることが好ましい。

【0135】フリー磁性層24、30及び固定磁性層22、26、28、32の磁化方向がこのように調節されることにより、図1の磁気検出素子Rが、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、この磁気検出素子Rがパルス信号を直接出力できる。

【0136】図2は、図1に示される磁気検出素子Rが、平面形状を有し、面垂直方向に磁化される記録媒体、すなわち垂直磁気記録式の記録媒体に記録された記録信号磁界を検出している状態を示す模式図である。

【0137】なお、図2では、固定磁性層22、26、28、32を構成する層のうち、磁気抵抗効果に直接寄与する第2固定磁性層22c、26a、28c、32aのみを図示している。

【0138】磁気検出素子Rが記録媒体M1の領域M1a上にあり、上側多層膜Uと下側多層膜Lに同じY方向(記録媒体からの漏れ磁界方向; ハイト方向)の漏れ磁界が与えられるとき(状態A)には、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向が同じようにY方向に近づくように回転変化する。その結果、一方のフリー磁性層24の磁化方向は、非磁性材料層23を介して対向している第2固定磁性層22c及び非磁性材料層25を介して対向している第2固定磁性層26aの両方にに対して、磁化方向が平行になる状態に近づく方向に変化し、他方のフリー磁性層30の磁化方向は、非磁性材料層29を介して対向している第2固定磁性層28c及び非磁性材料層31を介して対向している第2固定磁性層32aの両方の磁化方向と反平行になる状態に近づく方向に変化する。

【0139】従って、下側多層膜Lでは抵抗値が減少し、上側多層膜Uでは抵抗値が増加し、しかも、下側多層膜Lと上側多層膜Uは直列接続されているので、電圧変化を互いにキャンセルしあうことになる。従って、磁気検出素子Rが記録媒体の領域M1a上にのみ位置して

いるときには、磁気検出素子Rからの出力はゼロレベルになる。

【0140】記録媒体M1が図示Z方向に移動して、磁気検出素子Rが記録媒体M1の磁化遷移領域M1t上に位置すると、上側多層膜UにはY方向の漏れ磁界が与えられ、下側多層膜LにはY方向と180°異なる方向の漏れ磁界が与えられる状態になる（状態B）。

【0141】このとき、フリー磁性層24の磁化方向はY方向と180°異なる方向に近づくように回転変化し、フリー磁性層30の磁化方向はY方向に近づくように回転変化する。

【0142】その結果、一方のフリー磁性層24の磁化方向は、非磁性材料層23を介して対向している第2固定磁性層22c及び非磁性材料層25を介して対向している第2固定磁性層26aの両方に対して、磁化方向が180°異なる状態に近づく方向に変化する。また、他方のフリー磁性層30の磁化方向も、非磁性材料層29を介して対向している第2固定磁性層28c及び非磁性材料層31を介して対向している第2固定磁性層32aの両方の磁化方向と180°異なる状態になる状態に近づく方向に変化する。

【0143】従って、下側多層膜Lと上側多層膜Uの両方で同時に抵抗値が増加し、しかも、下側多層膜Lと上側多層膜Uは直列接続されているので、磁気検出素子Rからの電圧出力はプラスレベルになる。

【0144】さらに、磁気検出素子Rと記録媒体M1の相対位置が変化し、磁気検出素子Rが領域M1b上に位置して、上側多層膜Uと下側多層膜LにY方向と180°異なる方向の漏れ磁界が与えられるとき（状態C）と、下側多層膜Lでは抵抗値が増加し、上側多層膜Uでは抵抗値が減少し、しかも、下側多層膜Lと上側多層膜Uは直列接続されているので、電圧変化を互いにキャンセルしあうことになる。従って、磁気検出素子Rが記録媒体の領域M1b上にのみ位置しているときには、磁気検出素子Rからの出力はゼロレベルになる。

【0145】すなわち、磁気検出素子Rが記録媒体M1の磁化遷移領域M1tをまたいで移動すると、図2中に示された磁気検出素子Rからの信号出力を示す出力曲線O1に示されるように、プラスレベルのパルス信号Pを磁気検出素子Rが直接出力できる。このため、従来のように磁気検出素子Rからの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子RのS/N比を大きくすることができる。

【0146】しかも本発明では、デュアルスピンドル型の上側多層膜Uと下側多層膜Lが重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の2倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の5倍の大きさの出力を得ることができることが示され

る。

【0147】なお、図1の磁気検出素子において、第1固定磁性層22a、26c、28a、32cの膜厚t1、t8、t11、t18は全て等しくt1=t8=t11=t18である。また、第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの膜厚t2、t7、t12、t17の膜厚は全て等しくt2=t7=t12=t17である。さらに、非磁性中間層22b、26b、28b、32cの膜厚t3、t9、t13、t19の膜厚は全て等しくt3=t9=t13=t19である。

【0148】従って、4つの固定磁性層22、26、28、32の膜厚は全て等しくなっている。

【0149】さらに、下側多層膜Lを構成しているフリー磁性層24の膜厚t5と上側多層膜Uを構成しているフリー磁性層30の膜厚t15も等しくなっておりt5=t15である。また、4つの非磁性材料層23、25、29、31の膜厚t4、t6、t14、t16の膜厚も全て等しく、t4=t6=t14=t16である。

【0150】また、3つの反強磁性層21、27、33の膜厚t0、t10、t20も全て等しくt0=t10=t20である。

【0151】固定磁性層22、26、28、32、フリー磁性層24、30、非磁性材料層23、25、29、31、反強磁性層21、27、33の膜厚を上記のごとく調節すると、上側多層膜U及び下側多層膜Lの電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくなり、上側多層膜U及び下側多層膜Lに同じ方向の漏れ磁界が与えられたとき

（図2の状態AまたはC）に、上側多層膜U及び下側多層膜が互いの電圧変化を正確にキャンセルしあうことになるので、図2に示される出力曲線O1のようにパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力Z1、Z2を正確にベースライン（ゼロレベル）にあわせることができ容易になる。

【0152】上側多層膜Uと下側多層膜Lの磁気抵抗変化が異なると、図2に示される出力曲線O2のように、ベースラインがずれるベースラインシフトといわれる現象が生じて信号処理上の支障となるので好ましくない。

【0153】なお、前記反強磁性層は磁気抵抗変化に直接関係する層ではないので、上記実施の形態において、必ずしも3つの反強磁性層21、27、33の膜厚t0、t10、t20が全て同じでなくともよい。

【0154】なお、図1に示された磁気検出素子Rの線記録分解能は、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離で決まる。図1に示された磁気検出素子Rの、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離は150Å～300Åである。

【0155】また、図1に示される磁気検出素子Rのフリー磁性層24、30の代わりに、Co、CoFe合金、CoFeNi合金、NiFe合金などで形成され、単位面積当りの磁気モーメントが異なる第1フリー磁性

層と第2フリー磁性層が、Ru、Rh、Ir、Cr、Re、Cuのうち1種あるいは2種以上の非磁性導電性合金で形成された非磁性中間層を介して積層される、シンセティックフェリ型のフリー磁性層を用いてもよい。

【0156】ただし、シンセティックフェリ型のフリー磁性層は、第1フリー磁性層と第2フリー磁性層の磁化方向が180°異なる反平行方向を向いているので、上側多層膜U及び下側多層膜Lから検出出力を得るために、第2固定磁性層22cと第2固定磁性層26aの磁化方向を180°異なる反平行方向にし、かつ第2固定磁性層28cと第2固定磁性層32aの磁化方向を180°異なる反平行方向にする必要がある。

【0157】その上で、本発明の効果を得るために、第2固定磁性層22cと第2固定磁性層32aの磁化方向を180°異なる反平行方向にする必要がある。

【0158】シンセティックフェリ型のフリー磁性層であれば、フリー磁性層の物理的な膜厚を厚く形成しても、合成磁気モーメントが小さくなつて磁気的な膜厚を小さくすることができるから、フリー磁性層を外部磁界に対し感度良く磁化反転させることができ、再生出力の向上を図ることができる。

【0159】図3は、本発明の第2の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。なお、図3ではX方向に延びる素子の中央部分のみを破断して示している。

【0160】図3に示される磁気検出素子R1は、上側多層膜Uと下側多層膜Lの間に、硬磁性層50を介して2層の反強磁性層51及び52が積層され、フリー磁性層24、30の側面に對向するハードバイアス層が形成されていない点で図1に示される磁気検出素子Rと異なつてゐる。

【0161】図3に示される磁気検出素子R1において、図1と同じ符号で示される層は同じ材料を用いて同じ膜厚で形成されている。

【0162】反強磁性層51及び52は、反強磁性層21、33と同じ材料同じ組成比で形成されている。なお、反強磁性層51と反強磁性層52は等しい膜厚で形成されている。

【0163】硬磁性層50はCoPtなどによって形成される。なお硬磁性層50の膜厚は50～300Åであることが好ましい。

【0164】また、硬磁性層50と反強磁性層51及び52の間には、硬磁性層50と反強磁性層51及び52間の交換結合を防止するために、非磁性材料からなる分離層53、54が形成されている。分離層54を形成するに、NiFe合金、Ni-Fe-Y合金（ただしYは、Cr、Rh、Ta、Hf、Nb、Zr、Tiから選ばれる少なくとも1種以上）、Crを用いると、反強磁性層52のシードレイヤとして機能させることができるので好ましい。また、分離層53と分離層54は等し

い膜厚で形成されている。また、分離層53としてCrやWなどを用いると硬磁性層50の保磁力や角形比を高めることができ好ましい。

【0165】図3に示される磁気検出素子R1では、硬磁性層50がいわゆるインスタックバイアス層として機能し、硬磁性層50の側端部とフリー磁性層24、30の側端部間に静磁的な結合Mが発生することによって、フリー磁性層24、30の磁化方向が一方向にそろえられる。

10 【0166】本発明のように上側多層膜Uと下側多層膜Lの間に、インスタックバイアス層として機能する硬磁性層50が形成されると、上側多層膜Uと下側多層膜Lのそれぞれに形成されているフリー磁性層24及びフリー磁性層30に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することができる。

【0167】本実施の形態のように、硬磁性層50を挟む反強磁性層51と反強磁性層52の膜厚が等しいと、フリー磁性層24と硬磁性層50間の距離とフリー磁性層30と硬磁性層50間の距離が等しくなつて、フリー磁性層24とフリー磁性層30に供給される縦バイアス磁界が等しくさせることができ容易になる。

【0168】一方、図1に示されるような、フリー磁性層24の側面に對向するハードバイアス層36及びフリー磁性層30の側面に對向するハードバイアス層39が形成されることにより、フリー磁性層24及びフリー磁性層30に縦バイアス磁界を供給するものでは、フリー磁性層24及びフリー磁性層30に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することは困難である。

【0169】何故なら、フリー磁性層24及びフリー磁性層30に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給するためには、ハードバイアス層36の膜厚と残留磁化の積とハードバイアス層39の残留磁化と膜厚の積を正確に等しくすることが必要になるが、上側多層膜Uと下側多層膜Lの両側部に、ハードバイアス層36とハードバイアス層39の全てを残留磁化と膜厚の積が等しくなるように形成することが難しいためである。また、フリー磁性層24とフリー磁性層30のそれぞれの側端部で隣接するハードバイアス層の位置関係、形状、実質的な体積を全く同じにすることが難しいためである。

40 【0170】さらに、図3に示された磁気検出素子R1では、フリー磁性層24、30内に反磁界が生じるバッククリーニング現象や、フリー磁性層24、30の磁化が側端面付近で強固に固定され磁化反転が悪化する不感領域の発生問題を解消できる。

【0171】従つて、フリー磁性層24、30の単磁化を適切に促進でき、またフリー磁性層24、30の外部磁界に対する磁化反転を良好にでき、再生感度が良く再生波形の安定性に優れた磁気検出素子R1を製造することが可能である。

50 【0172】図3に示される磁気検出素子R1でも、フ

リー磁性層 24、30 及び固定磁性層 22、26、28、32 の磁化方向が図 1 に示される磁気検出素子 R と同様に調節されることにより、磁気検出素子 R 1 が、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、この磁気検出素子 R 1 がパルス信号を直接出力できる。

【0173】また、固定磁性層 22、26、28、32、フリー磁性層 24、30、非磁性材料層 23、25、29、31、反強磁性層 21、33 の膜厚も、図 1 に示される磁気検出素子 R と同様に調節されている。

【0174】各層の膜厚の調節とフリー磁性層 24 及びフリー磁性層 30 に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することにより、上側多層膜 U 及び下側多層膜 L の電気抵抗値や磁気抵抗変化率を等しくでき、上側多層膜 U 及び下側多層膜 L に同じ方向の漏れ磁界が与えられたとき（図 2 の状態 A または C）に、上側多層膜 U 及び下側多層膜 L が互いの電圧変化を正確にキャンセルしあうよう 10 できる。

【0175】したがって、磁気検出素子 R 1 がパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を正確にゼロレベルにあわせることができると容易になる。

【0176】しかも本実施の形態では、デュアルスピンドル型の上側多層膜 U と下側多層膜 L が重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を 1 つだけ有する磁気検出素子の 2 倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を 1 つだけ有する磁気検出素子の 5 倍の大きさの出力を得ることができることが示される。

【0177】図 4 の磁気検出素子 R 2 は、図 3 の磁気検出素子から非磁性材料層 25、固定磁性層 26、反強磁性層 51、反強磁性層 52、固定磁性層 28、及び非磁性材料層 29 が除かれた層構造を有している。

【0178】すなわち、図 4 の磁気検出素子 R 2 は、デュアルスピンドル型の磁気検出素子のフリー磁性層が分断されてインスタックバイアス層として機能する硬磁性層が挿入されたものである。

【0179】図 4 に示される磁気検出素子 R 2 でも、硬磁性層 50 がいわゆるインスタックバイアス層として機能し、硬磁性層 50 の側端部とフリー磁性層 24、30 の側端部間に静磁的な結合 M が発生することによって、40 フリー磁性層 24、30 の磁化方向が一方向にそろえられる。

【0180】インスタックバイアス層として機能する硬磁性層 50 によって縦バイアス磁界を供給する構成であると、フリー磁性層 24 及びフリー磁性層 30 に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することができる。

【0181】また、図 4 に示される磁気検出素子 R 2 でも、フリー磁性層 24、30 及び固定磁性層 22、32 の磁化方向が図 1 に示される磁気検出素子 R と同様に調節されることにより、磁気検出素子 R 2 が、記録媒体の

磁化遷移領域をまたいで移動するときに、この磁気検出素子 R 2 がパルス信号を直接出力できる。

【0182】また、固定磁性層 22、32、フリー磁性層 24、30、非磁性材料層 23、31、反強磁性層 21、33 の膜厚も、図 1 に示される磁気検出素子 R と同様に調節されている。

【0183】各層の膜厚の調節とフリー磁性層 24 及びフリー磁性層 30 に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することにより、磁気検出素子 R 2 の硬磁性層 50 より下層にある領域と硬磁性層 50 より上層にある領域の電気抵抗値や磁気抵抗変化率とを等しくできる。従って、フリー磁性層 24 及びフリー磁性層 30 に同じ方向の漏れ磁界が与えられたときに、フリー磁性層 24 と固定磁性層 22 間の電圧変化とフリー磁性層 30 と固定磁性層 32 間の電圧変化が互いにキャンセルしあうよう 10 できる。

【0184】すなわち、磁気検出素子 R 2 がパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を正確にゼロレベルにあわせることができると容易になる。

【0185】図 5 は、本発明における第 3 の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。なお、図 5 では X 方向に延びる素子の中央部分のみを破断して示している。

【0186】図 5 に示された磁気検出素子 R 3 の、反強磁性層 21、下側多層膜 L、反強磁性層 27、上側多層膜 U、反強磁性層 33 の積層構造は、図 1 に示された磁気検出素子 R と同じである。また、反強磁性層 21、27、33 の膜厚、フリー磁性層 24、30 の膜厚、及び非磁性材料層 23、25、29、31 の膜厚も図 1 に示された磁気検出素子と同じである。

【0187】図 5 に示された磁気検出素子 R 3 と図 1 に示された磁気検出素子 R の相違点は、固定磁性層 22、26、28、32 を構成している第 1 固定磁性層 22a、26c、28a、32c 及び第 2 固定磁性層 22c、26a、28c、32a の膜厚である。

【0188】図 5 に示された磁気検出素子 R 3 の下側多層膜 L では、第 1 固定磁性層 22a、26c の膜厚 t21、t24 が、第 2 固定磁性層 22c、26a の膜厚 t22、t23 より小さくなっている。すなわち、t21 < t22、t24 < t23 である。

【0189】一方、上側多層膜 U では、第 1 固定磁性層 28a、32c の膜厚 t25、t28 が、第 2 固定磁性層 28c、32a の膜厚 t26、t27 より大きくなっている。すなわち、t25 > t26、t28 > t27 である。

【0190】図 5 に示された磁気検出素子 R 3 でも図 1 に示された磁気検出素子 R と同様に、下側多層膜 L 中にあるシンセティックフェリ型の固定磁性層 22 の第 1 固定磁性層 22a は、反強磁性層 21 との間の交換結合磁界によって、磁化方向が Y 方向と 180° 異なった方向

に固定されており、第2固定磁性層22cの磁化方向はY方向に固定されている。同様に、シンセティックフェリ型の固定磁性層26の第1固定磁性層26cは反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向と180°異なる方向に固定されており、第2固定磁性層26aの磁化方向はY方向に固定されている。

【0191】一方、上側多層膜U中にあるシンセティックフェリ型の固定磁性層28の第1固定磁性層28aは、反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向（ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向）に固定されており、第2固定磁性層28cの磁化方向はY方向と180°異なる方向に固定されている。同様に、シンセティックフェリ型の固定磁性層32の第1固定磁性層32cは反強磁性層33との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向に固定されており、第2固定磁性層32aの磁化方向はY方向と180°異なる方向に固定されている。

【0192】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はハードバイアス層36または39との磁気的結合により、固定磁性層22、26、28、32の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、電気抵抗値の変化（出力）に直接寄与する第2固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されていない状態で直交していることが好ましい。

【0193】フリー磁性層24、30及び固定磁性層22、26、28、32の磁化方向がこのように調節されることにより、図5の磁気検出素子R3が、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、この磁気検出素子R3がパルス信号を直接出力できる。このため、従来のように磁気検出素子R3からの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子R3のS/N比を大きくすることができる。

【0194】しかも本発明では、デュアルスピンドル型の上側多層膜Uと下側多層膜Lが重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の2倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の5倍の大きさの出力を得ることができることが示される。

【0195】また、磁気検出素子R3において、第1固定磁性層22a、26c、28a、32c及び第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの膜厚構成を上記のようにすることにより、磁気検出素子R3を形成するときに一回の磁場中アニールを行うだけで、下側多層膜L中の第1固定磁性層22a、26cの磁化方向をY方向と180°異なる方向に固定し、上側多層膜U中の第1固定磁性層28a、32cをY方向に固定するこ

とができる。この点については後述する。

【0196】ただし、図5に示される磁気検出素子R3は図1に示される磁気検出素子Rと異なり、第1固定磁性層22a、26c、28a、32cの膜厚が全て等しいものではなく、また、第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの膜厚も全て等しくはない。

【0197】このため、上側多層膜U及び下側多層膜Lの電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくならず、上側多層膜U及び下側多層膜Lに同じ方向の漏れ磁界が与えられたとき（図2の状態AまたはC）に、上側多層膜U及び下側多層膜が互いの電圧変化を正確にキャンセルすることが困難になり、図2の出力曲線O2のようにパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力Z1、Z2がゼロレベルにあわせにくくなる。

【0198】図6は、本発明における第4の実施形態の磁気検出素子を記録媒体との対向面側から見た部分断面図である。なお、図6ではX方向に延びる素子の中央部分のみを破断して示している。

【0199】図6に示される磁気検出素子R4は固定磁性層61、62、63、64がシンセティックフェリ型でない单一磁化方向を向いた構造である点で図1に示される磁気検出素子Rと異なっている。

【0200】下側多層膜L1中にある固定磁性層61は反強磁性層21との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向（ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向）に固定されている。同様に、固定磁性層62は反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向に固定されている。

【0201】一方、上側多層膜U1中にある固定磁性層63は反強磁性層27との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向と180°異なる方向に固定されている。同様に、固定磁性層64は反強磁性層33との間の交換結合磁界によって、磁化方向がY方向と180°異なる方向に固定されている。

【0202】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はハードバイアス層36または39との磁気的結合により、固定磁性層61、62、63、64の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されていない状態で直交していることが好ましい。

【0203】フリー磁性層24、30及び固定磁性層61、62、63、64の磁化方向がこのように調節されている磁気検出素子R4でも、磁気検出素子R4が記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、この磁気検出素子R4がパルス信号を直接出力できる。このため、従来のように磁気検出素子R4からの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子R4のS/N比を大きくすることができる。

【0204】なお、図6の磁気検出素子R4において、固定磁性層61、62、63、64の膜厚t30、t31、t32、t33は全て等しくt30=t31=t32=t33である。

【0205】さらに、下側多層膜L1を構成しているフリー磁性層24の膜厚t5と上側多層膜U1を構成しているフリー磁性層30の膜厚t15も等しくなっておりt5=t15である。また、4つの非磁性材料層23、25、29、31の膜厚t4、t6、t14、t16の膜厚も全て等しく、t4=t6=t14=t16である。

【0206】また、3つの反強磁性層21、27、33の膜厚t0、t10、t20も全て等しくt0=t10=t20である。

【0207】固定磁性層61、62、63、64、フリー磁性層24、30、非磁性材料層23、25、29、31、反強磁性層21、27、33の膜厚を上記のごとく調節すると、上側多層膜U1及び下側多層膜L1の電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくなり、上側多層膜U1及び下側多層膜L1に同じ方向の漏れ磁界が与えられたときに、上側多層膜U1及び下側多層膜が互いの電圧変化を正確にキャンセルしあうことになるので、図2に示される出力曲線O1のようにパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力Z1、Z2を正確にゼロレベルにあわせることができることになる。

【0208】なお、図1、図5及び図6に示される磁気検出素子R、R3、R4のフリー磁性層24、30を単磁区化するための縦バイアス磁界を、図3に示されるように上側多層膜U、U1と下側多層膜L、L1の間に設けられたインスタックバイアス層として働く硬磁性層によって供給してもよい。あるいは、ハードバイアス層36、39の間の絶縁層37をなくしてハードバイアス層を一体のものとして形成してもよい。

【0209】なお、図1から図6の磁気検出素子の光学トラック幅は、絶縁層42のトラック幅方向間隔寸法で決められる。本実施の形態の磁気検出素子では、光学トラック幅を0.1μm以下、特に0.06μm以下にして、200Gbit/in<sup>2</sup>以上の記録密度に対応することができる。

【0210】図1に示された磁気検出素子の製造方法を説明する。図7及び図8は、図1に示される磁気検出素子Rの製造方法の実施の形態を示す工程図であり、製造過程にある磁気検出素子を記録媒体との対向面側からみた断面図である。

【0211】まず、図示しない基板上に、下部シールド層及び電極層20を成膜する。なお下部シールド層が電極層20を兼用するものであってもよい。

【0212】さらに、図7に示すごとく、下から順に反強磁性層21、第1固定磁性層22aと非磁性中間層22bと第2固定磁性層22cからなる固定磁性層22、

非磁性材料層23、フリー磁性層24、非磁性材料層25、及び第2固定磁性層26aと非磁性中間層26bと第1固定磁性層26cからなる固定磁性層26が積層された下側多層膜並びに第1中間反強磁性層27a及び貴金属からなる非磁性保護層27bまでを、スパッタ法を用いて真空中で連続成膜する。

【0213】スパッタ法としては、例えばマグネットロンスパッタ、RF2極スパッタ、RF3極スパッタ、イオンビームスパッタ、対向ターゲット式スパッタ等の既存するスパッタ装置を用いたスパッタ法によって形成することができる。また本発明では、スパッタ法や蒸着法の他に、MBE(モレキュラービームエピタキシー)法、ICB(イオンクラスターービーム)法などの成膜プロセスが使用可能である。

【0214】なお、図7及び図8において、図1と同じ符号がつけられた層は、同じ材料同じ膜厚で形成されている。

【0215】なお、第1中間反強磁性層27aは、後に反強磁性層27を構成する層であり、反強磁性層21と同じ組成の材料で形成される。

【0216】具体的には、第1中間反強磁性層27aを、PtMn合金、または、X-Mn(ただしXは、Pd、Ir、Rh、Ru、Os、Ni、Feのいずれか1種または2種以上の元素である)合金で、あるいはPt-Mn-X'(ただしX'は、Pd、Ir、Rh、Ru、Au、Ag、Os、Cr、Ni、Ar、Ne、Xe、Krのいずれか1または2種以上の元素である)合金で形成する。

【0217】非磁性保護層27bは大気暴露によって酸化されにくい緻密な層である必要がある。本発明では非磁性保護層27bを貴金属を用いて形成する。例えば、Ru、Re、Pd、Os、Ir、Pt、Au、Rhのいずれか1種または2種以上からなる貴金属で形成することが好ましい。

【0218】Ruなどの貴金属を用いてスパッタ成膜することにより、大気暴露によって酸化されにくい緻密な非磁性保護層27bを得ることができる。したがって非磁性保護層27bの膜厚を薄くしても第1中間反強磁性層27aが大気暴露によって酸化されることを適切に防止できる。

【0219】本発明では非磁性保護層27bを3Å以上で10Å以下で形成することが好ましい。より好ましくは、3Å以上で8Å以下で形成することである。この程度の薄い膜厚の非磁性保護層27bによっても第1中間反強磁性層27aが大気暴露によって酸化されるのを適切に防止することが可能である。

【0220】このように薄い膜厚で非磁性保護層27bを形成したことによって、非磁性保護層27bが酸化されて形成された酸化層及び非磁性保護層27bの非酸化部分の一部または全部を除去するために行うイオンミリ

ングを、低エネルギーで行うことができミリング深さ制御を従来に比べて向上させることができる。また、第1中間反強磁性層27a表面構造の損傷を低減できる。

【0221】図7に示すように基板上に電極層20から非磁性保護層27bまでの各層を積層した後、第1の磁場中アニールを施す。

【0222】ここで、第1の磁場中アニールの磁界の大きさの条件について説明する。まず、シンセティックフェリ構造の固定磁性層の保磁力、スピンドロップ磁界、及び飽和磁界について説明する。

【0223】図11は、固定磁性層をシンセティックフェリ構造にした場合のヒステリシスループの概念図である。例えば第1固定磁性層(P1)の単位面積あたりの磁気モーメント(飽和磁化Ms × 膜厚t)は第2固定磁性層(P2)の単位面積あたりの磁気モーメントよりも小さいとする。また外部磁界を図示右方向に与えたとする。

【0224】外部磁界の大きさが保磁力Hcを越えると、前記第1及び第2固定磁性層の磁化は適切に単磁区化されて反平行状態になり、第1固定磁性層の単位面積あたりの磁気モーメントと第2固定磁性層の単位面積あたりの磁気モーメントとのベクトル和(|Ms · t (P1) + Ms · t (P2)|)で求めることができる単位面積あたりの合成磁気モーメントが0より大きくなる。

【0225】外部磁界の大きさが変化しても単位面積あたりの合成磁気モーメントが一定の大きさに維持される外部磁界領域Aでは、前記第1固定磁性層と第2固定磁性層間に働く反平行結合力が、前記外部磁界よりも強いので、前記第1及び第2固定磁性層の磁化は適切に単磁区化され、反平行状態に保たれている。

【0226】ところが、さらに図示右方向への外部磁界を大きくしていくと、固定磁性層の単位面積あたりの合成磁気モーメントは傾斜角を有して大きくなっていく。これは、前記外部磁界の方が、第1固定磁性層及び第2固定磁性層間に働く反平行結合力よりも強いので、反平行状態になっていた第1固定磁性層と第2固定磁性層の磁化が互いに別方向に回転しはじめ、ベクトル和で求めることができる単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなっていくためである。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなっていく外部磁界領域Bでは、固定磁性層の反平行状態は崩れた状態にある。この単位面積あたりの合成磁気モーメントが大きくなり始める出発点の外部磁界の大きさをスピンドロップ磁界(Hsf)と呼んでいる。

【0227】さらに図示右方向の外部磁界を大きくしていくと、第1固定磁性層及び第2固定磁性層の磁化は完全に平行状態となって単磁区化され、今度は外部磁界領域Aの場合と異なり、共に図示右方向に磁化され、この外部磁界領域Cでの単位面積あたりの合成磁気モーメントは一定値となる。この単位面積あたりの合成磁気モー

メントが一定値となる時点での外部磁界の大きさを飽和磁界(Hs)と呼んでいる。

【0228】ここで、図7に示される下側多層膜Lの磁場中アニールのときは、方向が図示Y方向(ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向)と180°異なる方向であり、大きさが固定磁性層22及び固定磁性層26の飽和磁界(Hs)より大きい磁界を印加している。具体的には、800(kA/m)以上であることが好ましい。

10 【0229】従って第1の磁場中アニール時には、固定磁性層22の第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22c並びに固定磁性層26の第1固定磁性層26c、第2固定磁性層26aは、全て図示Y方向と180°異なる方向に向けられる。

【0230】あるいは、アニール時の磁界の大きさを図11の領域Aとなるように適度に弱く(例えば8(kA/m)～24(kA/m))してもよい。この場合、第1固定磁性層22aと第2固定磁性層22cの磁化方向が反平行の状態で、また固定磁性層26の第1固定磁性層26cと第2固定磁性層26aの磁化方向も反平行の状態でアニールされる。そして、第2固定磁性層22c、第2固定磁性層26aの磁化方向はアニール磁場の方向を向いた状態、第1固定磁性層22a、第1固定磁性層26cの磁化方向はアニール磁場の方向と180°異なる方向を向いた状態で固定される。従って、アニール磁場の方向を図示Y方向とすれば上記と同様の固定磁性層22及び固定磁性層26の磁化状態になる。

【0231】なお、アニール温度は、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間及び第1中間反強磁性層27aと第1固定磁性層26c間に交換異方性磁界が発生する温度より高くしている。具体的には、250℃～300℃であることが好ましい。

【0232】この状態で、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間及び第1中間反強磁性層27aと第1固定磁性層26c間に交換異方性磁界が発生するため、第1の磁場中アニール後、第1固定磁性層22aと第1固定磁性層26cの磁化方向は図示Y方向と180°異なる方向に固定される。

【0233】反強磁性層21及び第1中間反強磁性層27aは、PtMn合金、または、X-Mn(ただしXは、Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である)合金で、あるいはPt-Mn-X'(ただしX'は、Pd, Ir, Rh, Ru, Au, Ag, Os, Cr, Ni, Ar, Ne, Xe, Krのいずれか1または2種以上の元素である)合金で形成されている。これらの合金は、成膜直後の状態では、不規則系の面心立方構造(fcc)であるが、熱処理によってCuAuI型の規則型の面心正方構造(fcc)に構造変態することによって強磁性材料からなる層との間に交換結合磁界を発生させる。

【0234】特に、PtMn合金であれば、48kA/m以上、例えば64kA/mを越える交換結合磁界を有し、前記交換結合磁界を失うブロッキング温度が380℃と極めて高い優れた反強磁性層21及び第1中間反強磁性層27aを得ることができる。

【0235】なお、反強磁性層21及び第1中間反強磁性層27aの膜厚は80Å～300Å、例えば150Åである。

【0236】そして、固定磁性層22の第2固定磁性層22cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層22aの磁化方向の反平行方向を向き、固定磁性層26の第2固定磁性層26aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層26cの磁化方向の反平行方向を向く。

【0237】また上記した第1の磁場中アニールによって、非磁性保護層27bを構成するRuなどの貴金属元素が、第1中間反強磁性層27a内部に拡散するものと考えられる。従って熱処理後における第1中間反強磁性層27aの表面近くの構成元素は、第1中間反強磁性層27aを構成する元素と貴金属元素とから構成される。また第1中間反強磁性層27a内部に拡散した貴金属元素は、第1中間反強磁性層27aの下面側よりも第1中間反強磁性層27aの表面側の方が多く、拡散した貴金属元素の組成比は、第1中間反強磁性層27aの表面から下面に向うに従って徐々に減るものと考えられる。このような組成変調は、SIMS分析装置など薄膜の化学組成を分析する装置で確認することが可能である。

【0238】次に、非磁性保護層27bをイオンミリングで削る。非磁性保護層27bは、1Å～3Åの膜厚で残されるかあるいは全て除去される。

【0239】このイオンミリング工程では、低エネルギーのイオンミリングを使用できる。その理由は、非磁性保護層27bが3Å～10Å程度の非常に薄い膜厚で形成されているからである。

【0240】低エネルギーのイオンミリングとは、ビーム電圧（加速電圧）が1000V未満のイオンビームを用いたイオンミリングであると定義される。例えば、150V～500Vのビーム電圧が用いられる。本実施の形態では、200Vの低ビーム電圧のアルゴン（Ar）イオンビームを用いている。

【0241】これに対し、非磁性保護層27bに例えばTa膜を使用すると、このTa膜自体、大気暴露によって酸化されるので、30Å～50Å程度の厚い膜厚で形成しないと、十分にその下の層を酸化から保護できず、しかもTa膜は酸化によって体積が大きくなり、Ta膜の膜厚は約50Å以上にまで膨れ上がる。

【0242】このような厚い膜厚のTa膜をイオンミリングで除くには、高エネルギーのイオンミリングでTa膜を除去する必要があり、高エネルギーのイオンミリングを使用すると、Ta膜のみが除去されるようにミリン

グ制御することは非常に難しい。

【0243】従って、Ta膜の下に形成されている第1中間反強磁性層27aも深く削られ、第1中間反強磁性層27aに、イオンミリング時に使用されるArなどの不活性ガスが露出した第1中間反強磁性層27aの表面から内部に入り込んだり、第1中間反強磁性層27aの表面部分の結晶構造が壊れ、格子欠陥が発生（Mixing効果）する。これらのダメージによって第1中間反強磁性層27aの磁気特性が劣化しやすい。また、約50Å以上の膜厚を有するTa膜を低エネルギーのイオンミリングで削ると処理時間がかかりすぎて実用的でなくなる。また、Taは前記貴金属に比べると、成膜時に第1中間反強磁性層27aに拡散浸入しやすく、Ta膜のみを削って除去できたとしても、露出した第1中間反強磁性層27a表面には、Taが混入する。Taが混入した第1中間反強磁性層27aは、反強磁性特性が劣化する。

【0244】一方、本発明では、低エネルギーのイオンミリングによって非磁性保護層27bを削ることができ。低エネルギーのイオンミリングはミリングレートが遅く、ミリング止め位置のマージンを狭くすることが可能になる。特に、非磁性保護層27bをイオンミリングで除去した瞬間にミリングを止めることも可能になる。従って、第1中間反強磁性層27aはイオンミリングによって大きなダメージを受けなくなる。なお、非磁性保護層27bを削るためのイオンミリングの入射角度は、非磁性保護層27b表面に対する法線方向から30°～70°にすることが好ましい。また、イオンミリングの処理時間は1分～10分程である。

【0245】ただし、非磁性保護層27bを完全に除去すると、第1中間反強磁性層27aの表面がイオンミリングによって損傷し、反強磁性が低下することがあるので、非磁性保護層27bを1Å～3Åの膜厚で残す方が好ましい。

【0246】次に、上記低エネルギーのイオンミリング後、真空を破らずに図8工程を施す。図8工程では、第1中間反強磁性層27a、或いは非磁性保護層27bが完全に除去されないときには残された非磁性保護層27b上に、第2中間反強磁性層27cを真空中で成膜して、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cを有する反強磁性層27とし、この反強磁性層27上に、下から順に第1固定磁性層28aと非磁性中間層28bと第2固定磁性層28cからなる固定磁性層28、非磁性材料層29、フリー磁性層30、非磁性材料層31、及び第2固定磁性層32aと非磁性中間層32bと第1固定磁性層32cからなる固定磁性層32を有する上側多層膜U、及び反強磁性層33をスパッタ法により真空中で連続成膜する。成膜には上述したスパッタや蒸着法を使用できる。なお、反強磁性層33の上層にTaなどからなる保護層を形成してもよい。

【0247】第2中間反強磁性層27cに使用される材質は、第1中間反強磁性層27aに使用される反強磁性材料と同じ組成の反強磁性材料、具体的には上述のPt-Mn合金、X-Mn合金で、あるいはPt-Mn-X'合金を用いて形成されることが好ましい。

【0248】図8では、第1中間反強磁性層27a、残存している非磁性保護層27b、及び第2中間反強磁性層27cが一体となって反強磁性層27を構成している。非磁性保護層27bが完全に除去される場合には、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cが一体となって反強磁性層27を構成する。

【0249】第1中間反強磁性層27aの膜厚と第2中間反強磁性層27cの膜厚を合わせた総合膜厚は80Å以上で500Å以下であればよい。例えば150Åである。

【0250】また、非磁性保護層27bが残存している場合でも、残存している非磁性保護層27bの膜厚は1Å以上で3Å以下と薄く、また、Ru、Re、Pd、Os、Ir、Pt、Au、Rhのいずれか1種または2種以上で形成されているので、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27cに反強磁性的な相互作用を生じさせ、第1中間反強磁性層27a、非磁性保護層27b、第2中間反強磁性層27cが一体の反強磁性層27として機能することが可能になる。また、非磁性保護層27bの材料が、第1中間反強磁性層27aと第2中間反強磁性層27c中に拡散しても、反強磁性は劣化しない。

【0251】次に上側多層膜Uの第1固定磁性層28aと反強磁性層27間及び第1固定磁性層32cと反強磁性層33間に交換結合磁界を発生させ、第1固定磁性層28a及び第1固定磁性層32cの磁化方向を固定するための第2の磁場中アニールを施す。

【0252】第2の磁場中アニールのときは、方向が図示Y方向（ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向）と180°異なる方向であり、大きさが固定磁性層28及び固定磁性層32の保磁力（Hc）より大きくスピンスロップ磁界（Hsf）より小さい磁界を印加する。具体的には、8(kA/m)～24(kA/m)であることが好ましい。

【0253】また、第2の磁場中アニール時に、下側多層膜Lの固定磁性層22及び26の磁化方向の変化を抑えるために、第2の磁場中アニール時の印加磁界の大きさを、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間に及び第1中間反強磁性層27aと第1固定磁性層26c間に発生している交換異方性磁界の大きさより小さくする必要がある。

【0254】なお、アニール温度は、反強磁性層33と第1固定磁性層32c間及び第2中間反強磁性層27cと第1固定磁性層28a間に交換異方性磁界が発生する温度より高くする。具体的には、250℃～300℃で

あることが好ましい。

【0255】また、第2の磁場中アニール時のアニール温度は、下側多層膜Lの反強磁性層21及び反強磁性層27が各々と接する第1固定磁性層との界面での交換結合磁界を失うブロッキング温度より低くする必要がある。

【0256】第2の磁場中アニール時には、第1固定磁性層28aより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層28c並びに第1固定磁性層32cより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層32aの磁化方向が図示Y方向と180°異なる方向に向けられる。

【0257】そして、固定磁性層28の第1固定磁性層28aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層28cの磁化方向の反平行方向を向き、固定磁性層32の第1固定磁性層32cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層32aの磁化方向の反平行方向を向く。

【0258】この状態で、反強磁性層27と第1固定磁性層28a間及び反強磁性層33と第1固定磁性層32c間に交換異方性磁界が発生するため、第2の磁場中アニール後、第1固定磁性層28aと第1固定磁性層32cの磁化方向は図示Y方向に固定される。

【0259】本実施の形態のように、下側多層膜Lの成膜及び第1の磁場中アニールを行った後、上側多層膜Uの成膜及び第2の磁場中アニールを施す製造方法を用いると反強磁性層21、反強磁性層27、及び反強磁性層33を、同一の組成比を有する反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0260】次に図8に示すように、反強磁性層33または反強磁性層33の上層に形成された保護層（図示せず）の上面にレジスト層70を形成し、このレジスト層70を露光現像することによって、図8に示す形状のレジスト層70を残す。レジスト層70は例えばリフトオフ用のアンダーカット形状を有するレジスト層である。

【0261】次に、レジスト層70に覆われていない部分を図8の一点鎖線に沿って、イオンミリングによって削る。

【0262】イオンミリング工程終了後、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やSiO<sub>2</sub>などで形成された絶縁層34、バイアス下地層35、ハードバイアス層36、絶縁層37、バイアス下地層38、ハードバイアス層39、絶縁層40をレジスト層70がついた状態で成膜する。なお、ハードバイアス層36はフリー磁性層24の側面に対向する位置、ハードバイアス層39はフリー磁性層30の側面に対向する位置に形成する。

【0263】次に、レジスト層70を有機溶剤などを用いたリフトオフで除去する。さらに、絶縁層40上から反強磁性層33のトラック幅方向（図示X方向）の両側端部上にまで、所定の間隔T1をあけて絶縁層42をバ

ターン形成する。

【0264】そして絶縁層42から反強磁性層33上にかけて第2の電極層41を形成し、電極層41の上面に接して、同じくNiFeなどの軟磁性材料からなる上部シールド層(図示せず)を形成する。ただし、NiFeなどの軟磁性材料は導電性を有するので、上部シールド層を直接反強磁性層33の上面に接するように形成して電極層として機能させてもよい。

【0265】こうして、図1に示されるように、固定磁性層22の第2固定磁性層22c、固定磁性層26の第2固定磁性層26aが図示Y方向を向き、固定磁性層28の第2固定磁性層28c及び固定磁性層32の第2固定磁性層32aの磁化方向が図示Y方向と180°異なる方向に固定される磁気検出素子Rが得られる。

【0266】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はハードバイアス層36、39との磁気的結合により、固定磁性層22、26、28、32の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、電気抵抗値の変化(出力)に直接寄与する第2固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されていない状態で直交することが好ましい。

【0267】フリー磁性層24、30及び固定磁性層22、26、28、32の磁化方向をこのように調節することにより、磁気検出素子Rは記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、パルス信号を直接出力できる磁気検出素子となる。

【0268】このため、従来のように磁気検出素子Rからの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子RのS/N比を大きくすることができる。

【0269】しかも磁気検出素子Rは、デュアルスピンドル型の上側多層膜Uと下側多層膜Lが重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の2倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の5倍の大きさの出力を得ることができることが示される。

【0270】なお、図1に示されるように、磁気検出素子Rは、第1固定磁性層22a、26c、28a、32cの膜厚t1、t8、t11、t18が全て等しくt1=t8=t11=t18となるように成膜形成されている。また、第2固定磁性層22c、26a、28c、32aの膜厚t2、t7、t12、t17の膜厚は全て等しくt2=t7=t12=t17となるようにされている。さらに、非磁性中間層22b、26b、28b、32cの膜厚t3、t9、t13、t19の膜厚は全て等しくt3=t9=t13=t19となるようにされている。

【0271】従って、4つの固定磁性層22、26、28、32の膜厚は全て等しくなっている。

【0272】さらに、下側多層膜Lを構成しているフリー磁性層24の膜厚t5と上側多層膜Uを構成しているフリー磁性層30の膜厚t15も等しく形成され、t5=t15である。また、4つの非磁性材料層23、25、29、31の膜厚t4、t6、t14、t16の膜厚も全て等しく形成され、t4=t6=t14=t16である。

【0273】これらの層の膜厚は各層の成膜時に調節できる。また、3つの反強磁性層21、27、33の膜厚t0、t10、t20も全て等しく形成され、t0=t10=t20である。

【0274】固定磁性層22、26、28、32、フリー磁性層24、30、非磁性材料層23、25、29、31、反強磁性層21、27、33の膜厚を上記のごとく調節すると、上側多層膜U及び下側多層膜Lの電気抵抗値や磁気抵抗変化率が等しくなり、上側多層膜U及び下側多層膜Lに同じ方向の漏れ磁界が与えられたとき

(図2の状態AまたはC)に、上側多層膜U及び下側多層膜Lが互いの電圧変化を正確にキャンセルしあうことになるので、図2に示される出力曲線O1のようにパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力Z1、Z2を正確にゼロレベルにあわせることができなる。

【0275】なお、図1に示された磁気検出素子Rの線記録分解能は、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離で決まる。図1に示された磁気検出素子は、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離が200Å～300Åとなるように成膜形成されている。

【0276】次に、図3に示された磁気検出素子R1の製造方法を説明する。図9及び図10は、図3に示される磁気検出素子R1の製造方法の実施の形態を示す工程図であり、製造過程にある磁気検出素子R1を記録媒体との対向面側からみた断面図である。

【0277】まず、図示しない基板上に、下部シールド層(図示せず)及び電極層20を成膜する。なお下部シールド層が電極層20を兼用するものであってもよい。

【0278】さらに、図9に示すごとく、下から順に反強磁性層21、第1固定磁性層22aと非磁性中間層22bと第2固定磁性層22cからなる固定磁性層22、非磁性材料層23、フリー磁性層24、非磁性材料層25、及び第2固定磁性層26aと非磁性中間層26bと第1固定磁性層26cからなる固定磁性層26が積層された下側多層膜L並びに反強磁性層51、分離層53、硬磁性層50、及び分離層54をスパッタ法を用いて真空中で連続成膜する。

【0279】スパッタ法としては、例えばマグネットロンスパッタ、RF2極スパッタ、RF3極スパッタ、イオニビームスパッタ、対向ターゲット式スパッタ等の既存

するスパッタ装置を用いたスパッタ法によって形成することができる。また本発明では、スパッタ法や蒸着法の他に、MBE（モレキュラービームエピタキシー）法、ICB（イオンクラスターービーム）法などの成膜プロセスが使用可能である。

【0280】なお、図9及び図10において、図3と同じ符号がつけられた層は、同じ材料同じ膜厚で形成されている。

【0281】なお、反強磁性層51は反強磁性層21と同じ組成の材料で形成される。具体的には、反強磁性層51を、PtMn合金、または、X-Mn（ただしXは、Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Ni, Feのいずれか1種または2種以上の元素である）合金で、あるいはPt-Mn-X'（ただしX'は、Pd, Ir, Rh, Ru, Au, Ag, Os, Cr, Ni, Ar, Ne, Xe, Krのいずれか1または2種以上の元素である）合金で形成する。

【0282】硬磁性層50はCoPtなどの硬磁性材料からなり、いわゆるインスタックバイアス層として機能するものである。

【0283】分離層53、54は、反強磁性層51と硬磁性層50間に図10工程で形成される反強磁性層52と硬磁性層50間に交換結合磁界が発生することを抑えるためのものであり、非磁性導電性材料で形成される。特に分離層54はNiFe合金、Ni-Fe-Y合金（ただしYは、Cr, Rh, Ta, Hf, Nb, Zr, Tiから選ばれる少なくとも1種以上）、Crなどを用いて形成し、反強磁性層52のシードレイヤとして機能させることが好ましい。なお、図9工程では、分離層53も分離層54と同じ材料を用いて形成している。ただし、分離層53は硬磁性層50の保磁力や角型比を高めるために、Cr、Wなどのbcc（体心立方）構造を有する金属を{100}配向させて用いることが好ましい。

【0284】図9に示すように基板上に電極層20から分離層54までの各層を積層した後、第1の磁場中アニールを施す。

【0285】ここで、第1の磁場中アニールの磁界の大きさの条件について説明する。第1の磁場中アニールのときは、方向が図示Y方向（ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向）と180°異なる方向であり、大きさが固定磁性層22及び固定磁性層26の飽和磁界(Hs)より大きい磁界を印加している。具体的には、800(kA/m)以上であることが好ましい。

【0286】従って第1の磁場中アニール時には、固定磁性層22の第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22c並びに固定磁性層26の第1固定磁性層26c、第2固定磁性層26aは、全て図示Y方向と180°異なる方向に向けられる。

【0287】あるいは、アニール時の磁界の大きさを図

11の領域Aとなるように適度に弱く（例えば8(kA/m)～24(kA/m)）してもよい。この場合、第1固定磁性層22aと第2固定磁性層22cの磁化方向が反平行の状態で、また固定磁性層26の第1固定磁性層26cと第2固定磁性層26aの磁化方向も反平行の状態でアニールされる。そして、第2固定磁性層22c、第2固定磁性層26aの磁化方向はアニール磁場の方向を向いた状態、第1固定磁性層22a、第1固定磁性層26cの磁化方向はアニール磁場の方向と180°異なる方向を向いた状態で固定される。従って、アニール磁場の方向を図示Y方向とすれば上記と同様の固定磁性層22及び固定磁性層26の磁化状態になる。

【0288】なお、アニール温度は、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間に及第1反強磁性層27aと第1固定磁性層26c間に交換異方性磁界が発生する温度より高くしている。具体的には、250℃～300℃であることが好ましい。

【0289】従って第1の磁場中アニール時には、固定磁性層22の第1固定磁性層22a、第2固定磁性層22c並びに固定磁性層26の第1固定磁性層26c、第2固定磁性層26aは、全て図示Y方向と180°異なる方向に向けられる。

【0290】この状態で、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間に及反強磁性層27aと第1固定磁性層26c間に交換異方性磁界が発生するため、第1の磁場中アニール後、第1固定磁性層22aと第1固定磁性層26cの磁化方向は図示Y方向と180°異なる方向に固定される。

【0291】なお、反強磁性層21及び反強磁性層51の膜厚は80Å～300Å、例えば150Åである。

【0292】そして、固定磁性層22の第2固定磁性層22cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層22aの磁化方向の反平行方向を向き、固定磁性層26の第2固定磁性層26aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層26cの磁化方向の反平行方向を向く。

【0293】次に、分離層54の表面をイオンミリングで削って表面の酸化膜を除去する。次に図10工程を施す。図10工程では、除去されずに残された分離層54上に図9工程で用いたのと同じ材料を積層して分離層54の膜厚を増加させ、さらに連続して反強磁性層52、第1固定磁性層28aと非磁性中間層28bと第2固定磁性層28cからなる固定磁性層28、非磁性材料層29、フリー磁性層30、非磁性材料層31、及び第2固定磁性層32aと非磁性中間層32bと第1固定磁性層32cからなる固定磁性層32を有する上側多層膜U、及び反強磁性層33をスパッタ法により真空中で成膜する。成膜には上述したスパッタや蒸着法を使用できる。なお、反強磁性層33の上層にTaなどからなる保護層を形成してもよい。

【0294】反強磁性層52に使用される材質は、反強磁性層51に使用される反強磁性材料と同じ組成の反強磁性材料、具体的には上述のPtMn合金、X-Mn合金で、あるいはPt-Mn-X'合金を用いて形成されることが好ましい。

【0295】反強磁性層52の膜厚は、80Å以上で500Å以下であればよい。例えば150Åである。

【0296】次に上側多層膜Uの第1固定磁性層28aと反強磁性層52間及び第1固定磁性層32cと反強磁性層33間に交換結合磁界を発生させ、第1固定磁性層28a及び第1固定磁性層32cの磁化方向を固定するための第2の磁場中アニールを施す。

【0297】第2の磁場中アニールのときは、方向が図示Y方向(ハイト方向；記録媒体からの洩れ磁界方向)と180°異なる方向であり、大きさが固定磁性層28及び固定磁性層32の保磁力(Hc)より大きくスピンドロップ磁界(Hsf)より小さい磁界を印加する。具体的には、8(kA/m)～24(kA/m)であることが好ましい。

【0298】また、第2の磁場中アニール時に、下側多層膜Lの固定磁性層22及び26の磁化方向の変化を抑えるために、第2の磁場中アニール時の印加磁界の大きさを、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間及び反強磁性層51と第1固定磁性層26c間に発生している交換異方性磁界の大きさより小さくする必要がある。

【0299】なお、アニール温度は、反強磁性層52と第1固定磁性層28a間及び反強磁性層33と第1固定磁性層32c間に交換異方性磁界が発生する温度より高くする。具体的には、250℃～300℃であることが好ましい。

【0300】また、第2の磁場中アニール時のアニール温度は、下側多層膜Lの反強磁性層21及び反強磁性層51が各々と接する第1固定磁性層との界面での交換結合磁界を失うブロッキング温度より低くする必要がある。

【0301】第2の磁場中アニール時には、第1固定磁性層28aより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層28c並びに第1固定磁性層32cより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層32aの磁化方向が図示Y方向と180°異なる方向に向けられる。

【0302】そして、固定磁性層28の第1固定磁性層28aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層28cの磁化方向の反平行方向を向き、固定磁性層32の第1固定磁性層32cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層32aの磁化方向の反平行方向を向く。

【0303】この状態で、反強磁性層52と第1固定磁性層28a間及び反強磁性層33と第1固定磁性層32c間に交換異方性磁界が発生するため、第2の磁場中ア

ニール後、第1固定磁性層28aと第1固定磁性層32cの磁化方向は図示Y方向に固定される。

【0304】本実施の形態のように、下側多層膜Lの成膜及び第1の磁場中アニールを行った後、上側多層膜Uの成膜及び第2の磁場中アニールを施す製造方法を用いると反強磁性層21、反強磁性層51、反強磁性層52、及び反強磁性層33を、同一の組成比を有する反強磁性材料を用いて形成することができる。

【0305】また、図9では硬磁性層50を成膜してから第1の磁場中アニールを行った。ただし、分離層53を途中まで成膜した後に第1の磁場中アニールを施し、イオンミリングを行わずに、残りの分離層53を付けたし、硬磁性層50、分離層54を成膜した後、図10工程を行ってもよい。

【0306】第1のアニール後に、硬磁性層50を成膜すると、多層膜Lの[111]配向の影響を受けて硬磁性層50のc軸が膜面と垂直方向に向いて保磁力や角型比が低下してしまうことを抑えることができる。

【0307】次に図10に示すように、反強磁性層33または反強磁性層33の上層に形成された保護層(図示せず)の上面にレジスト層71を形成し、このレジスト層71を露光現像することによって、図10に示す形状のレジスト層71を残す。レジスト層71は例えばリフトオフ用のアンダーカット形状を有するレジスト層である。

【0308】次に、レジスト層71に覆われていない部分を図10の一点鎖線に沿って、イオンミリングによって削る。

【0309】イオンミリング工程終了後、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やSiO<sub>2</sub>などで形成された絶縁層55を形成する。

【0310】次に、レジスト層71を有機溶剤などを用いたリフトオフで除去する。さらに、絶縁層55上から反強磁性層33のトラック幅方向(図示X方向)の両側端部上にまで、所定の間隔T1をあけて絶縁層42をパターン形成する。

【0311】そして絶縁層42から反強磁性層33上にかけて第2の電極層41を形成し、電極層41の上面に接して、同じくNiFeなどの軟磁性材料からなる上部シールド層(図示せず)を形成する。ただし、NiFeなどの軟磁性材料は導電性を有するので、上部シールド層を直接反強磁性層33の上面に接するように形成して電極層として機能させてもよい。

【0312】こうして、図3に示されるように、固定磁性層22の第2固定磁性層22c、固定磁性層26の第2固定磁性層26aが図示Y方向を向き、固定磁性層28の第2固定磁性層28c及び固定磁性層32の第2固定磁性層32aの磁化方向が図示Y方向と180°異なる方向に固定される磁気検出素子R1が得られる。

【0313】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はインスタックバイアス層として機能す

る硬磁性層50との静磁気的結合により、固定磁性層22、26、28、32の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、電気抵抗値の変化（出力）に直接寄与する第2固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されていない状態で直交することが好ましい。

【0314】フリー磁性層24、30及び固定磁性層22、26、28、32の磁化方向をこのように調節することにより、磁気検出素子R1は記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、パルス信号を直接出力できる磁気検出素子となる。

【0315】このため、従来のように磁気検出素子からの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畳を低減でき結果として磁気検出素子R1のS/N比を大きくすることができる。

【0316】しかも磁気検出素子R1は、デュアルスピンドル型の上側多層膜Uと下側多層膜Lが重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の2倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の5倍の大きさの出力を得ることができることが示される。

【0317】また、固定磁性層22、26、28、32、フリー磁性層24、30、非磁性材料層23、25、29、31、反強磁性層21、33の膜厚も、図1に示される磁気検出素子Rと同様に調節されている。さらに、反強磁性層51と反強磁性層52の膜厚は等しくされ、分離層53と分離層54の膜厚も等しくされている。

【0318】各層の膜厚を調節し、硬磁性層50によりフリー磁性層24及びフリー磁性層30に均等な大きさの縦バイアス磁界を供給することにより、磁気検出素子R1でも、上側多層膜U及び下側多層膜Lの電気抵抗値や磁気抵抗変化率を等しくでき、上側多層膜U及び下側多層膜Lに同じ方向の漏れ磁界が与えられたとき（図2の状態AまたはC）に、上側多層膜U及び下側多層膜が互いの電圧変化を正確にキャンセルしあうようにできる。

【0319】したがって、磁気検出素子R1がパルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を正確にゼロレベルにあわせることができる。

【0320】なお、図3に示された磁気検出素子R1の線記録分解能は、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離で決まる。図3に示された磁気検出素子は、フリー磁性層24とフリー磁性層30間の距離が200Å～500Åとなるように成膜形成されている。

【0321】次に、図5に示された磁気検出素子の製造方法を説明する。まず、図示しない基板上に、下部シ

ルド層（図示せず）及び電極層20を成膜する。なお下部シールド層が電極層20を兼用するものであってもよい。

【0322】さらに、下から順に反強磁性層21、第1固定磁性層22aと非磁性中間層22bと第2固定磁性層22cからなる固定磁性層22、非磁性材料層23、フリー磁性層24、非磁性材料層25、及び第2固定磁性層26aと非磁性中間層26bと第1固定磁性層26cからなる固定磁性層26が積層された下側多層膜L、

反強磁性層27、第1固定磁性層28aと非磁性中間層28bと第2固定磁性層28cからなる固定磁性層28、非磁性材料層29、フリー磁性層30、非磁性材料層31、及び第2固定磁性層32aと非磁性中間層32bと第1固定磁性層32cからなる固定磁性層32を有する上側多層膜U、及び反強磁性層33をスパッタ法により真空中で連続成膜する。なお、反強磁性層33の上層にTaなどからなる保護層を形成してもよい。

【0323】スパッタ法としては、例えばマグネットロンスパッタ、RF2極スパッタ、RF3極スパッタ、イオシンビームスパッタ、対向ターゲット式スパッタ等の既存するスパッタ装置を用いたスパッタ法によって形成することができる。また本発明では、スパッタ法や蒸着法の他に、MBE（モレキュラービームエビタキシー）法、ICB（イオンクラスターービーム）法などの成膜プロセスが使用可能である。

【0324】反強磁性層21から反強磁性層33までを連続成膜するときに、下側多層膜Lの第1固定磁性層22a、26cの膜厚t21、t24を第2固定磁性層22c、26aの膜厚t22、t23より小さくする。すな

わち、 $t_{21} < t_{22}$ 、 $t_{24} < t_{23}$ にする。

【0325】また、上側多層膜Uの、第1固定磁性層28a、32cの膜厚t25、t28を、第2固定磁性層28c、32aの膜厚t26、t27より大きくする。すなわち、 $t_{25} > t_{26}$ 、 $t_{28} > t_{27}$ にする。

【0326】また、第1固定磁性層22a、26c、第2固定磁性層22c、26a、第1固定磁性層28a、32c、第2固定磁性層28c、32aは全て同じ組成比の磁性材料を用いて形成されている。

【0327】次に、反強磁性層21、下側多層膜L、反強磁性層27、上側多層膜U、及び反強磁性層33の積層体を、固定磁性層22、26、28、32の保磁力より大きく、スピンドル型磁界よりも小さい、図示Y方向の磁場中でアニールする。アニール時の磁界の大きさは、具体的には、8 (kA/m)～24 (kA/m)であることが好ましい。

【0328】なお、アニール温度は、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間及び反強磁性層27と第1固定磁性層26c並びに反強磁性層27と第1固定磁性層28a間及び反強磁性層33と第1固定磁性層32c間に交換異方性磁界が発生する温度より高くしている。具体

的には、250℃～300℃であることが好ましい。

【0329】固定磁性層22、26、28、32の保磁力より大きく、スピンドロップ磁界よりも小さい磁場中でアニールすると、まず第1固定磁性層22aより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層22c並びに第1固定磁性層26cより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第2固定磁性層26aの磁化方向が図示Y方向に向けられる。さらに、第2固定磁性層28cより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第1固定磁性層28a並びに第2固定磁性層32aより単位面積当たりの磁気モーメントが大きい第1固定磁性層32cの磁化方向が図示Y方向に向けられる。

【0330】そして、第1固定磁性層22aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層22cの磁化方向の反平行方向を向き、第1固定磁性層26cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第2固定磁性層26aの磁化方向の反平行方向を向く。さらに、第2固定磁性層28cの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層28aの磁化方向の反平行方向を向き、第2固定磁性層32aの磁化方向は、RKKY相互作用によって第1固定磁性層32cの磁化方向の反平行方向を向く。

【0331】この状態で、反強磁性層21と第1固定磁性層22a間及び反強磁性層27と第1固定磁性層26c並びに反強磁性層27と第1固定磁性層28a間及び反強磁性層33と第1固定磁性層32c間に交換異方性磁界が発生するため、磁場中アニール後、第1固定磁性層22aと第1固定磁性層26cの磁化方向は図示Y方向と180°異なる方向に固定され、第1固定磁性層28aと第1固定磁性層32cの磁化方向は図示Y方向に固定される。

【0332】さらに、反強磁性層21から反強磁性層33まで積層された積層体をレジストによるマスキング及びイオンミリングによって台形状に加工し、絶縁層34、バイアス下地層35、ハードバイアス層36、絶縁層37、バイアス下地層38、ハードバイアス層39、絶縁層40を成膜する。なお、ハードバイアス層36はフリー磁性層24の側面に対向する位置、ハードバイアス層39はフリー磁性層30の側面に対向する位置に形成する。

【0333】さらに、絶縁層40上から反強磁性層33のトラック幅方向(図示X方向)の両側端部上にまで、所定の間隔T1をあけて絶縁層42をパターン形成する。

【0334】そして絶縁層42から反強磁性層33上にかけて第2の電極層41を形成し、電極層41の上面に接して、同じくNiFeなどの軟磁性材料からなる上部シールド層(図示せず)を形成する。ただし、NiFeなどの軟磁性材料は導電性を有するので、上部シールド層を直接反強磁性層33の上面に接するように形成して

電極層として機能させてもよい。

【0335】こうして、図5に示されるように、固定磁性層22の第2固定磁性層22c、固定磁性層26の第2固定磁性層26aが図示Y方向を向き、固定磁性層28の第2固定磁性層28c及び固定磁性層32の第2固定磁性層32aの磁化方向が図示Y方向と180°異なる方向に固定される磁気検出素子R3が得られる。

【0336】なお、フリー磁性層24及びフリー磁性層30の磁化方向はハードバイアス層36、39との磁気的結合により、固定磁性層22、26、28、32の磁化方向と交叉する方向にそろえられている。特に、電気抵抗値の変化(出力)に直接寄与する第2固定磁性層の磁化方向とフリー磁性層の磁化方向の相対角が、検出電流が通電されている状態かつ信号磁界が印加されている状態で直交することが好ましい。

【0337】フリー磁性層24、30及び固定磁性層22、26、28、32の磁化方向をこのように調節することにより、磁気検出素子R3は記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときに、パルス信号を直接出力できる磁気検出素子となる。

【0338】このため、従来のように磁気検出素子からの出力を微分回路に通すことなく信号処理でき、ノイズの重畠を低減でき結果として磁気検出素子RのS/N比を大きくすることができる。

【0339】しかも磁気検出素子R3は、デュアルスピンドル型の上側多層膜Uと下側多層膜Lが重ねられた構造を有しているので、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の2倍以上の大きさの出力を得ることができる。特に、後述する実施例では、デュアルスピンドル型の多層膜を1つだけ有する磁気検出素子の5倍の大きさの出力を得ることができることが示される。

【0340】また、反強磁性層21から反強磁性層33まで、真空中で連続成膜することができるため、磁気検出素子中に大気中の不純物が混入することを避けることができる。

【0341】また本発明では、前記磁気検出素子の上に記録用のインダクティブヘッドが積層されていてよい。このとき、前記磁気検出素子の上側に形成されたシールド層(上部シールド層)は、前記インダクティブヘッドの下部コア層として兼用されてもよい。

【0342】また本発明では、多層膜をトンネル型磁気抵抗効果型素子と呼ばれる磁気検出素子とすることもできる。トンネル型磁気抵抗効果型素子では、非磁性材料層がAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やSiO<sub>2</sub>などの絶縁材料で形成される。

【0343】なお本発明における磁気検出素子は、ハードディスク装置に搭載される薄膜磁気ヘッドにのみ使用可能なものではなく、テープ用磁気ヘッドや磁気センサなどにも使用可能なものである。

【0344】以上本発明をその好ましい実施例に関して

述べたが、本発明の範囲から逸脱しない範囲で様々な変更を加えることができる。

【0345】

【実施例】図1に示される磁気検出素子R、デュアルスピンドル型のCPP型磁気検出素子及びシングルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の、膜面平行方向(X-Y平面方向)の断面積Aと磁気抵抗変化ΔRの関係を調べた。

【0346】磁気検出素子Rの膜構成は、下部電極/(Ni<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>60</sub>C<sub>140</sub>(55Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(80Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/上部電極である。

【0347】また、デュアルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の膜構成は、下部電極/(Ni<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>60</sub>C<sub>140</sub>(55Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(80Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/上部電極である。

【0348】さらに、シングルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の膜構成は、下部電極/(Ni<sub>0.8</sub>Fe<sub>0.2</sub>)<sub>60</sub>C<sub>140</sub>(55Å)/Pt<sub>50</sub>Mn<sub>50</sub>(170Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(35Å)/Ru(9Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(40Å)/Cu(30Å)/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>(80Å)/上部電極である。

【0349】これらの膜構成を有する磁気検出素子の膜面平行方向(X-Y平面方向)の断面積Aを変化させつつ、膜面垂直方向に定電流密度のセンス電流を流して磁気抵抗変化ΔRを測定した。結果を図12に示す。

【0350】なお、本実施例では、上記CPP型磁気検出素子に外部から一様磁界を印加してフリー磁性層を磁界方向に飽和させたときのFull-1loopでの磁気抵抗変化ΔRをプロットしている。従って、磁気検出素子Rについては、フリー磁性層24、30の磁化がともに同じ方向に向けられたときに磁気抵抗変化するよう、上側多層膜Uの第2固定磁性層28c、32aと下側多層膜Lの第2固定磁性層22c、26aの磁化方向を全て同じ方向に向けている。

【0351】図12のグラフから、断面積Aが同じとき、磁気検出素子Rの磁気抵抗変化ΔRは、デュアルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の磁気抵抗変化ΔRの5倍であり、またシングルスピンドル型のCPP

型磁気検出素子の磁気抵抗変化ΔRの25倍であることがわかる。

【0352】それぞれの磁気検出素子に流されるセンス電流の電流密度は同じなので、磁気検出素子Rは、デュアルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の5倍の電圧変化をし、またシングルスピンドル型のCPP型磁気検出素子の25倍の電圧変化をすることになる。

【0353】なお、上述した実施例はあくまでも例示であり、本発明の特許請求の範囲を限定するものではない。

【0354】

【発明の効果】以上詳細に説明した本発明の磁気検出素子は、下から順に固定磁性層、非磁性材料層、フリー磁性層、非磁性材料層、固定磁性層が積層された多層膜が2つ設けられ、さらに前記反強磁性層は、2つの前記多層膜の間と、下側に位置する前記多層膜の下面と上側に位置する前記多層膜の上面とに設けられているものである。

【0355】すなわち、本発明の磁気検出素子はいわゆるデュアルスピンドル型の磁気検出素子が2つ重ねられた構造を有しており、しかも、各層の膜面と垂直方向に電流が流れる、CPP (current perpendicular to the plane) 磁気検出素子である。

【0356】さらに、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記固定磁性層の磁化方向は反平行方向である。

【0357】これらの構成を有することにより、本発明の磁気検出素子は、記録媒体の磁化遷移領域をまたいで移動するときにパルス信号を出力できる。特に、面垂直方向に磁化される垂直磁気記録式の記録媒体からの洩れ磁界信号を再生するときに、本発明の磁気検出素子であればパルス信号を直に出力することができる。

【0358】しかも本発明では、デュアルスピンドル型の磁気検出素子が2つ重ねられた構造を有しているので、出力を向上させることができる。

【0359】また、本発明では、4つ全ての前記固定磁性層をシンセティックフェリ型の固定磁性層とすることができます。シンセティックフェリ型の固定磁性層は、第1固定磁性層と第2固定磁性層とが互いに他方の磁化方向を固定しあうので、全体として固定磁性層の磁化方向を一定方向に強力に固定することができる。

【0360】さらに、本発明では、前記固定磁性層を4つとも全て同じ膜厚で形成することができる。特に、全ての固定磁性層がシンセティックフェリ型の固定磁性層として形成されるときにも、各固定磁性層を構成している前記第1固定磁性層が全て同じ膜厚で形成でき、かつ前記第2固定磁性層も全て同じ膜厚で形成することができる。

【0361】本発明では、2つの多層膜を、それぞれ等しい膜厚の前記固定磁性層、前記フリー磁性層、前記非

磁性材料層、及び前記反強磁性層によって形成することができるので、2つの多層膜の電気抵抗値や磁気抵抗変化率を等しくでき、パルス信号を出力していないときの一定電圧出力時の電圧出力を正確にゼロレベルにあわせることができることになる。

【0362】また、本発明では、固定磁性層の膜厚を制御したり、磁場中アニールの条件を制御することにより、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの前記固定磁性層の磁化方向を反平行方向にした磁気検出素子を形成することができる。

【0363】特に、本発明では、全ての固定磁性層をシンセティックフェリ型の固定磁性層にしても、互いに異なるフリー磁性層に対向している2つの第2固定磁性層の磁化方向を反平行方向にした磁気検出素子を形成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態の磁気検出素子の断面図、

【図2】図1に示される磁気検出素子が垂直磁気記録式の記録媒体に記録された信号を再生している状態を示す模式図、

【図3】本発明の第2の実施の形態の磁気検出素子の断面図、

【図4】図3に示される磁気検出素子から上側多層膜Uと下側多層膜Lの間の反強磁性層51、52、固定磁性層26、28、及び非磁性材料層25、29を除いた磁気検出素子の断面図、

【図5】本発明の第3の実施の形態の磁気検出素子の断面図、

\* 【図6】本発明の第4の実施の形態の磁気検出素子の断面図、

【図7】本発明の磁気検出素子の製造方法の実施の形態を示す一工程図、

【図8】本発明の磁気検出素子の製造方法の実施の形態を示す一工程図、

【図9】本発明の磁気検出素子の製造方法の実施の形態を示す一工程図、

【図10】本発明の磁気検出素子の製造方法の実施の形態を示す一工程図、

【図11】シンセティックフェリ状態の積層磁性層の磁化状態と外部磁界との関係を示すグラフ、

【図12】磁気検出素子の素子サイズと磁気抵抗変化との関係を示すグラフ、

【図13】従来の磁気検出素子を示す模式図、

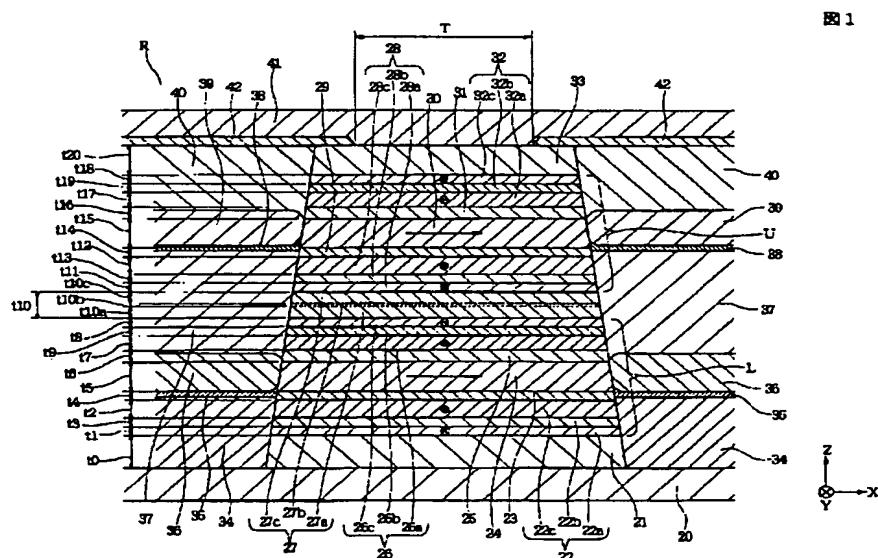
【図14】磁気検出素子Sが領域Maから領域Mbの記録磁界を検出したときの、磁気検出素子Sの出力信号波形、

【符号の説明】

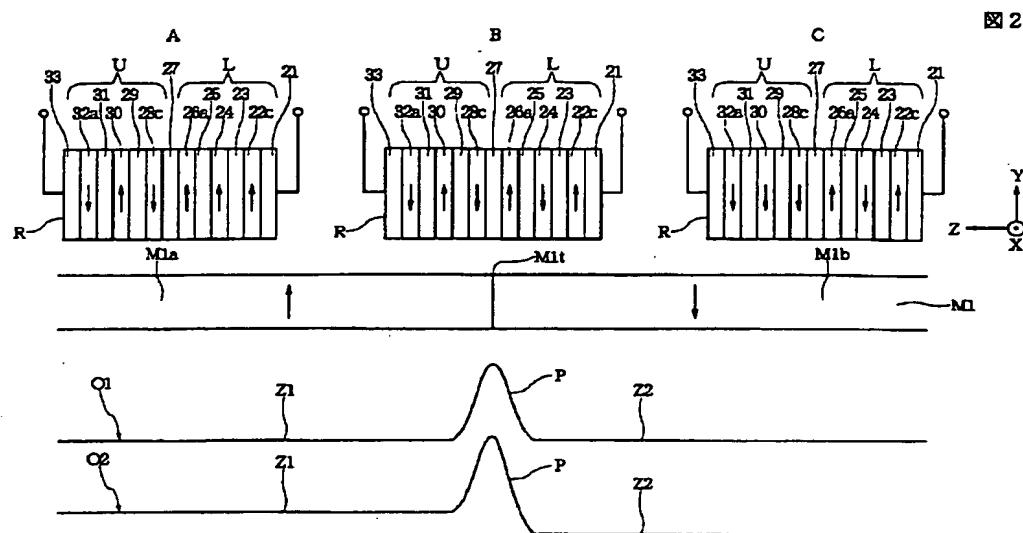
- 20 20、41 電極層
- 21 27、33 反強磁性層
- 22 26、28、32 固定磁性層
- 22a、26c、28a、32c 第1固定磁性層
- 22c、26a、28c、32a 第2固定磁性層
- 22b、26b、28b、32b 非磁性中間層
- 24、30 フリー磁性層
- 23、25、29、31 非磁性材料層
- 36、39 ハードバイアス層
- 50 硬磁性層

\*

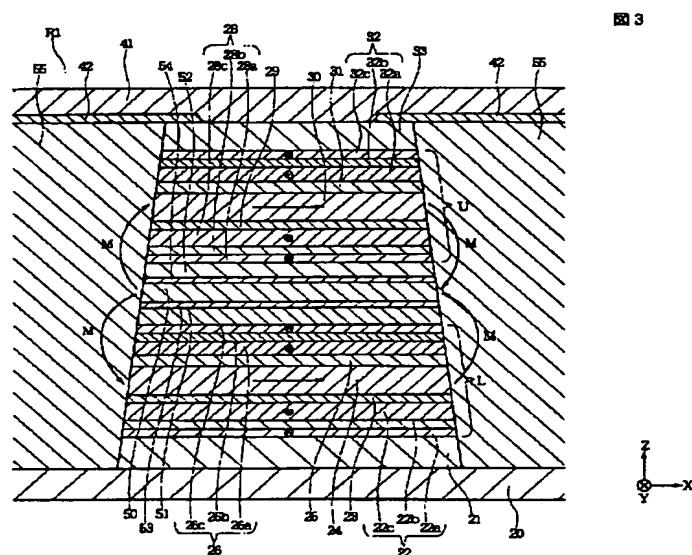
【図1】



【図2】



【図3】



【図14】

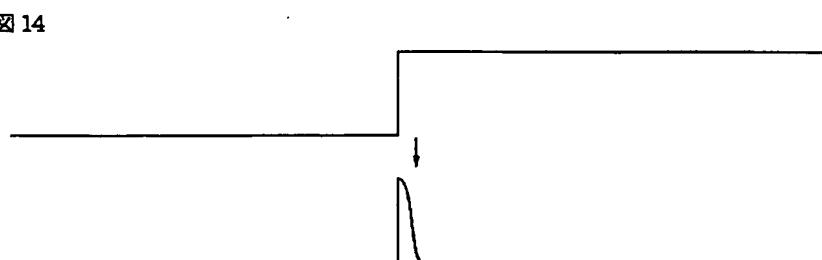
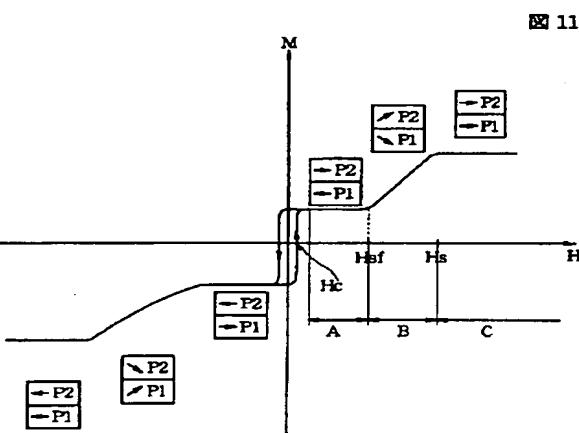


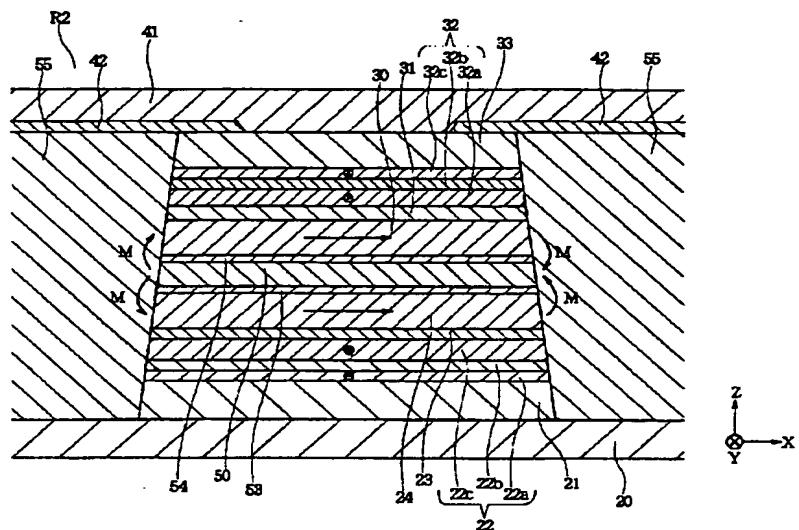
図3

【図11】



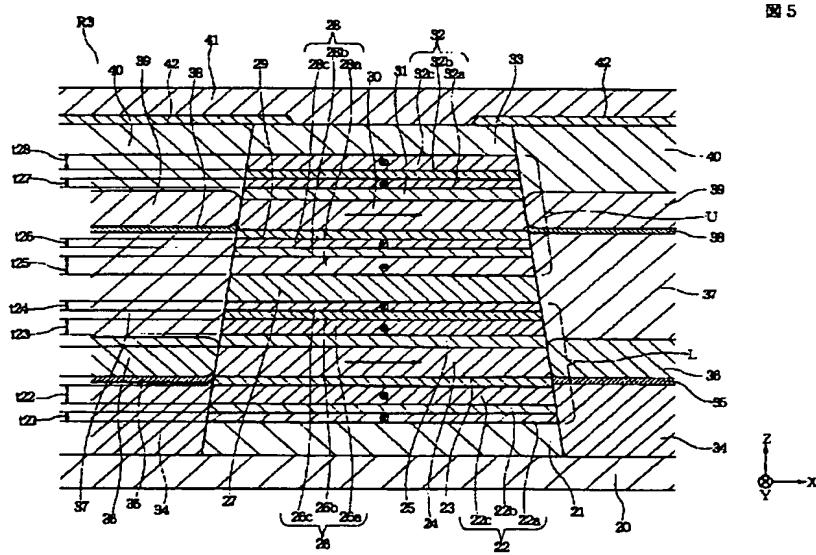
【図4】

図4



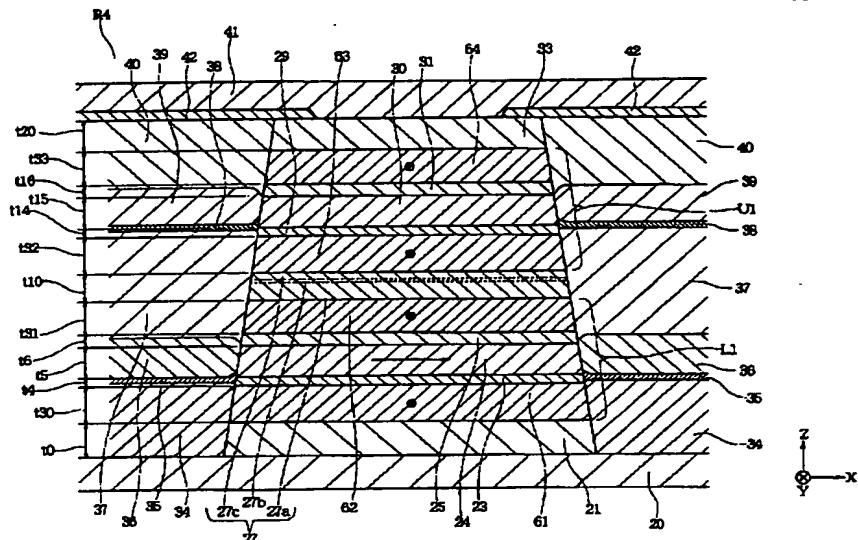
【図5】

図5



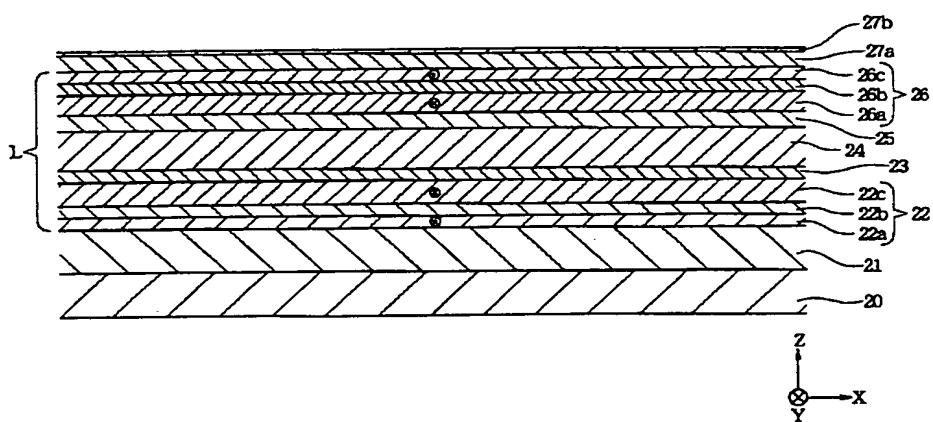
【図 6】

圖 6



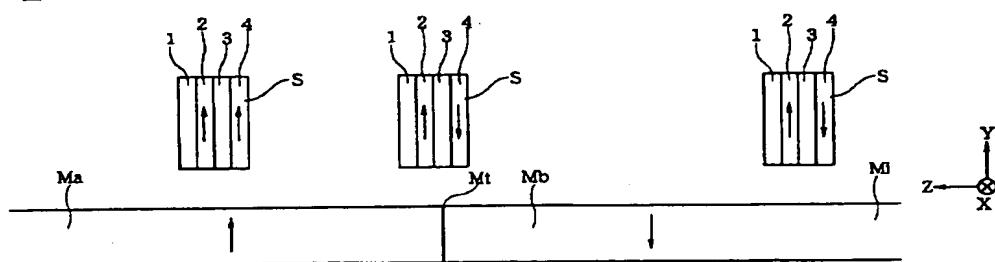
【図7】

7

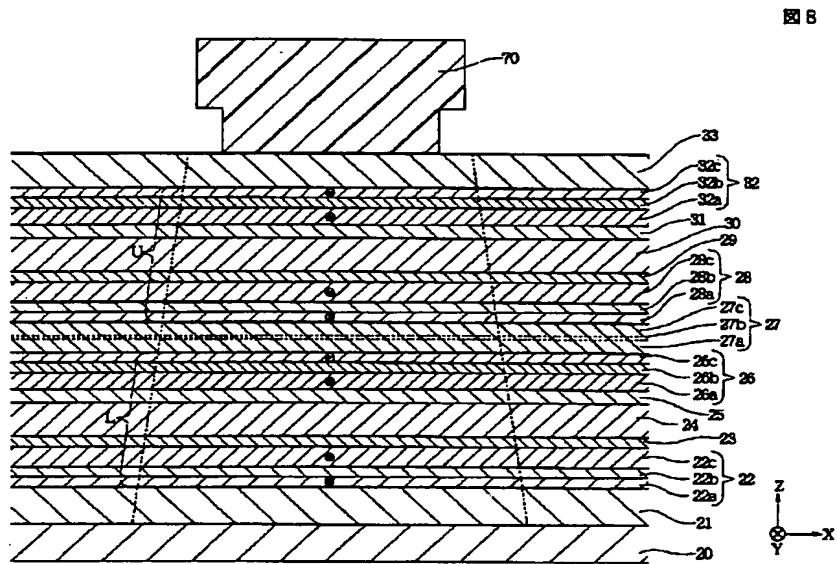


[图 13]

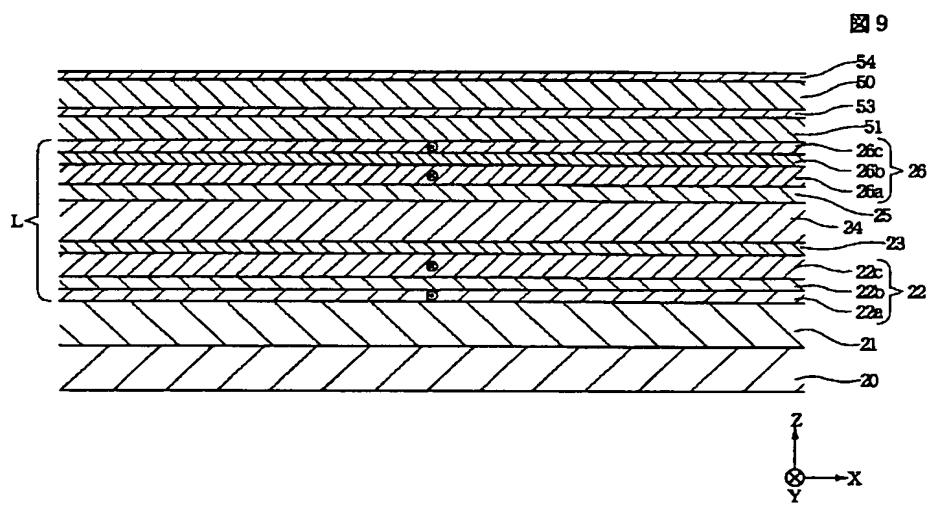
図 13



【図8】

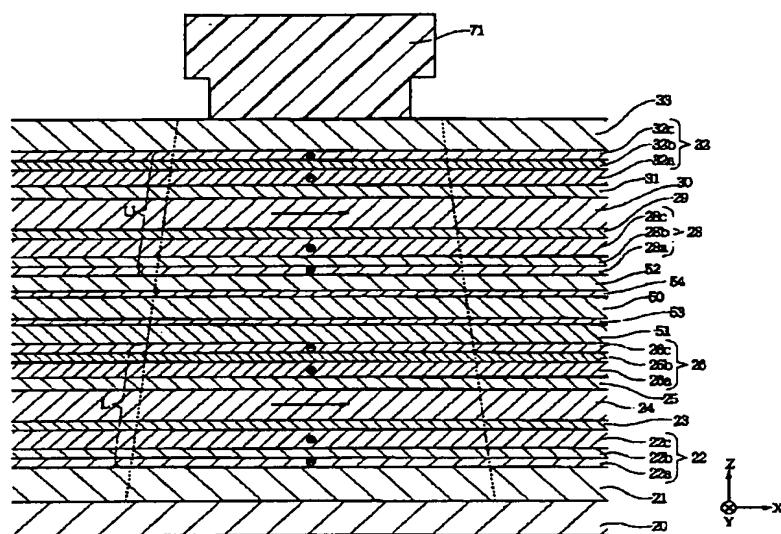


【図9】



【図10】

図10



【図12】

図12

